

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ П.А. СТОЛЫПИНА»

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.

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Керученко Леонид Степанович

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	12
1.1 Анализ изменения условий работы топливной аппаратуры ДВС с учётом технического состояния распылителей форсунок.....	12
1.2 Оценка ресурса материалов прецизионных пар распылителей в углеводородных жидкостях	17
1.3 Требования к устройствам подачи топлива. Критерии работоспособного состояния.	21
1.4 Анализ способов обеспечения работоспособного состояния прецизионных деталей топливной аппаратуры	23
1.4.1 Конструкционные способы обеспечения работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок	24
1.4.2 Технологические способы обеспечения работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок	26
1.4.3 Эксплуатационные способы обеспечения работоспособного состояния прецизионных сопряжений деталей распылителей форсунок	27
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ РАБОТОСПОСОБНОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПАР РАСПЫЛИТЕЛЕЙ ФОРСУНОК ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	31
2.1 Аналитическая модель изменения зазора в сопряжении «игла – корпус распылителя» форсунки	31
2.2 Функциональная модель для определения ресурса распылителя форсунки	35
2.3 Определение внутренней энергии поверхностных слоёв деталей распылителя форсунки	43
2.4 Критерии работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок	56

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	59
3.1 Программа исследований	59
3.2 Обоснование выбора марки топлива для проведения лабораторных исследований.	60
3.3 Методика лабораторных определений физических и эксплуатационных свойств дизельного топлива с присадкой ПТЛМ	60
3.4 Методика оценки противоизносных свойств моторного топлива...	62
3.5 Общая методика для проведения безмоторных стендовых испытаний форсунок ФД-22	64
3.6 Методика оценки гидроплотности прецизионных пар распылителей форсунок	67
3.7 Методика стендовых моторных испытаний	69
3.8 Методика планирования износных испытаний деталей распылителей форсунок	74
3.9 Оборудование для проведения лабораторных исследований	78
3.10 Методика проведения эксплуатационных испытаний распылителей форсунок при работе ДВС на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в условиях АПК	84
3.11 Обоснование выбора компонентов присадки	85
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ..	87
4.1 Результаты исследования физических и эксплуатационных свойств дизельного топлива	87
4.2 Результаты исследования трибологических характеристик дизельного топлива с присадкой ПТЛМ	90
4.3 Результаты проведения безмоторных стендовых испытаний форсунок ФД-22	93
4.4 Результаты оценки гидроплотности прецизионных пар распылителей форсунок	101
4.5 Результаты стендовых моторных испытаний	106

4.6 Результаты эксплуатационных испытаний распылителей форсунок при работе ДВС на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в условиях АПК	107
ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С ПРИСАДКОЙ ПТЛМ..	110
5.1 Расчет экономической эффективности применения присадки ПТЛМ	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	116
РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРИСАДКИ ПТЛМ К ДИЗЕЛЬНОМУ ТОПЛИВУ	118
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	119

Введение

Качественное и своевременное выполнение сельскохозяйственных операций, в большей мере, зависит от работоспособного состояния мобильных энергетических средств (МЭС). Работоспособное состояние – это состояние изделия, при котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. В связи с этим, в инженерную службу предприятий агропромышленного комплекса входят задачи по обеспечению функционирования дизельных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) мобильных энергетических средств (МЭС). Дизельные ДВС мобильных энергетических средств, в большей степени, зависят от обеспечения ресурса узлов и агрегатов. Решение этой задачи позволяет увеличить ресурс эксплуатируемой техники, и снизить затраты, связанные с её ремонтом. Анализ научных исследований, связанных с изнашиванием прецизионных сопряжений топливной аппаратуры, показывает связь износа со смазочными свойствами топлив. Для улучшения смазочных свойств топлив в их состав вводят присадки, повышающие их смазочную способность [5]. В настоящее время в основном используются противоизносные присадки иностранного производства: Infineum, BASF, Clariant, Lubrizol и др., состав которых не известен и не сертифицирован. Соответственно, эти присадки не могут удовлетворять ГОСТ 305 [38]. Внедрение в производство отечественных присадок, добавляемых в топливо на месте потребления, позволит существенно увеличить ресурс ДВС топливной аппаратуры дизелей.

Актуальность темы исследования. Современные МЭС, в настоящее время, оснащены дизельными ДВС. Одной из технически сложных и малоресурсной системой дизельных двигателей является топливная система [13,29,117,140]. Затраты на техническое обслуживание и ремонт топливной аппаратуры составляют до 30% общих затрат на МЭС [17].

Топливная аппаратура определяет мощностные и экономические показатели ДВС [5,17,34]. Развитие дизельных ДВС связано с повышением удельной мощности, топливной экономичности и обеспечения топливо-

экономических показателей, что связано с качеством подачи топлива. Высокое давление впрыска обеспечивается прецизионными сопряжениями топливной аппаратуры. Наличие в топливной системе прецизионных сопряжений определяет ресурс топливной аппаратуры дизельных двигателей. Согласно исследований [5,14,15,16,24,58,67], ресурс новых прецизионных сопряжений топливной аппаратуры составляет: у плунжерных пар – 700...3000 мото-часов; нагнетательных клапанов – 1400...2000 мото-часов; распылителей форсунок – 800...1600 моточасов. Затраты на техническое обслуживание и ремонт топливной аппаратуры составляет 30% общих затрат ремонта ДВС. Заводы – изготовители ставят задачу повышения ресурса топливной аппаратуры тракторных и комбайновых двигателей до 10...12 тыс. моточасов, а также снижения затрат труда на техническое обслуживание путём увеличения ремонтных сроков насоса до 3000 мото-часов, форсунок – до 2000 мото-часов [69]. С этой целью разработаны технологические процессы, направленные на повышение долговечности и износостойкости пар трения. При этом учитываются свойства материала поверхности пар трения, режимы работы деталей и свойства рабочей среды, обеспечивающие формирование защитного поверхностного слоя с целью обеспечения износостойкости при эксплуатации топливной аппаратуры [23]. Ресурс прецизионных пар топливной аппаратуры, определяется смазывающей способностью, что является следствием несовершенства существующих требований, предъявляемым к топливам.

В условиях рядовой эксплуатации необходимо обеспечить ресурс прецизионных пар, установленный заводом-изготовителем, за счёт 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 их применения и сравнение полученного эффекта с

дополнительными затратами, а следовательно поиск и обоснование вариантов применения присадок.

В связи с этим, исследование, направленное на обеспечение работоспособного состояния распылителей форсунок тракторных дизельных двигателей, применением присадки к дизельному топливу на основе растительных масел (присадка ПТЛМ), 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. 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 долговечность 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 теряет свои эксплуатационные свойства и становится малоэффективным в работе машинно-тракторного парка в условиях АПК. В результате ухудшения эксплуатационных свойств топлив 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 в топливе на основе таллового и льняного масел в дизельном топливе;
- результаты экспериментальных исследований и эксплуатационных испытаний прецизионных пар распылителей форсунок при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ.

Теоретическая значимость: результаты дополняют имеющиеся 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 требуемый 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.

Апробация результатов исследования. Основные положения отдельных вопросов и результаты работы доложены на научно – практических конференциях ФГБОУ ВО Омский ГАУ 2016–2020 г.г.; - на региональной научно-практической конференции «Научное и техническое обеспечение АПК,

состояние и перспективы развития» ФГБОУ ВО Омского ГАУ г. Омск, 28 апреля 2016 г.; - на XXXVI Международной научно-практической конференции «Стратегия устойчивого развития регионов России» г. Новосибирск, 15 декабря 2016 г.; - на VI Международном молодежном конкурсе научных работ «Молодежь в науке: Новые аргументы» г. Липецк, 12 апреля 2017 г.; - на II этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых учёных высших учебных заведений Министерства сельского хозяйства РФ г. Красноярск 2018 г.; - на III этапе Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых учёных высших учебных заведений Министерства сельского хозяйства РФ г. Москва 2018 г.; - на X региональной научно – практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти доцента М.А. Анфиногенова «Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: Новосибирск 2018 г.; - на Международной научно – технической конференция, посвященная 60-летию образования СибИМЭ СФНЦА РАН «Научно – техническое обеспечение АПК Сибири» г. Новосибирск 2019; - на кандидатском методическом семинаре в СФНЦА РАН. Новосибирск, 28 декабря 2020 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, из них 5 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в рецензируемом зарубежном журнале из базы 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 объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка, включающего 160 источников, в том числе 10 на иностранном языке. Диссертационная работа включает 145 страниц машинописного текста, 48 рисунков, 12 таблиц и 7 приложений.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ изменения условий работы топливной аппаратуры ДВС с учётом технического состояния распылителей форсунок

Отказы форсунок согласно ГОСНИТИ приведены на рисунке 1.1 [135]. В связи с конструктивными особенностями распылителей, распределение этих отказов у разных типов двигателей различно, что связано с отличием механических, гидродинамических, тепловых нагрузок, а также используемых материалов деталей распылителей. Кроме того отказы распылителей связаны с физическими свойствами используемых топлив.



1 – нарушение подвижности иглы; 2 – изменение качества распыла;
 3 – нарушение герметичности; 4 – нарушение гидроплотности; 5 – изнашивание сопловых отверстий; 6 – изменение размеров и формы распыливающих отверстий.

Рисунок 1.1 – Опытная вероятность распылителей форсунок по видам отказов

Анализ, представленных видов отказов (Рис.1.1) показывает, что наибольшая доля отказов приходится на износ сопловых отверстий, связанных с изменением размеров и формы распыливающих отверстий.

Изменение размеров и формы распыливающих отверстий возникает, как в результате изнашивания при кавитации, нагарообразования в сопловых отверстиях и их закоксовывании.

Изменения проходного сечения распылителя оказывают влияние на форму, качество распыла и распределение топливного факела в объеме камеры сгорания.

Расчёты, проведенные в МГТУ им. Н.Э. Баумана показывают [86], что для обеспечения оптимальной работы дизеля с форсунками ФД – 22 с условной площадью распыливающих отверстий $0,22 \text{ мм}^2$ при увеличении распыливающих отверстий до $0,3 \text{ мм}^2$, максимальное давление впрыскивания уменьшается в 2 раза. Снижение давления приводит к уменьшению индикаторного КПД двигателя и увеличению неравномерности подачи топлива. Согласно исследованию [26], при уменьшении давления впрыскивания от 16 до 12 МПа, индикаторный КПД уменьшается с 44 до 40%. При пониженном давлении топлива снижается дисперсность распыливания и ухудшается испарение, что приводит к неполному сгоранию крупных капель, и как следствие, снижению мощности дизеля на 10-15%, увеличению расхода топлива, образованию нагара и закоксовывание распылителя [141]. Наиболее интенсивное уменьшение давления происходит в течение первых 1000 мото-часов работы распылителя форсунки. В дальнейшем, примерно в интервале наработки 1000 – 2000 мото-часов, наблюдается замедленное снижение давления начала впрыскивания топлива. При снижении давления начала впрыскивания увеличивается цикловая подача топлива и дальнобойность струи, снижается дисперсность распыливания и ухудшается испарение топлива. Наличие крупных капель топлива размером до 200 мкм (нормативное значение – 1 – 30 мкм и менее) в конечной фазе впрыскивания приводит к его неполному сгоранию, что

приводит к увеличению расхода топлива и дымности отработавших газов. Экспериментальными исследованиями установлено [70], что при отклонении давления начала впрыскивания от номинального значения на 6,0 – 7,0 МПа расход топлива возрастает на 20 – 25%. При уменьшении распыливающих отверстий от 0,3 мм² до 0,22 мм², давление впрыскивания повышается примерно в 2 раза, однако авторы [5,6,9,58,67] отмечают, при чрезмерном уменьшении условной площади распыливающих отверстий форсунки возможно увеличение процесса впрыскивания топлива.

Нарушение подвижности иглы распылителя может происходить в результате попадания находящихся в топливе мелких механических частиц в зазор между иглой и корпусом распылителя, при деформации корпуса распылителя от монтажных усилий, при образовании кокса на поверхностях направляющего прецизионного сопряжения. Зависание иглы или перекос деталей форсунки обычно ведёт, к так называемым, «затяжным» впрыскам. Внешним признаком «затяжного» впрыска является чрезмерное падение (занижение) давления, получающееся после впрыска в системе стенда. Как уже указывалось, нормальное падение давления после впрыска должно составлять 4,0 – 6,0 МПа. При затяжных впрысках падение давления обычно достигает 8,5 МПа и более. Давление топлива под дифференциальной площадкой начинает снижаться до завершения посадки иглы в седло корпуса распылителя, что позволяет рабочим газам проникать внутрь распылителя и прогревать его элементы и топливо.

При зависании иглы в верхнем (открытом) положении топливо не распыляется, нарушаются процессы смесеобразования и сгорания. Зависание иглы в нижнем (закрытом) положении приводит к отсутствию впрыска топлива в цилиндры двигателя. В результате, частота вращения коленчатого вала резко снижается, а в топливной системе образуются высокие давления, которые могут вызвать разрушения в деталях топливного насоса.

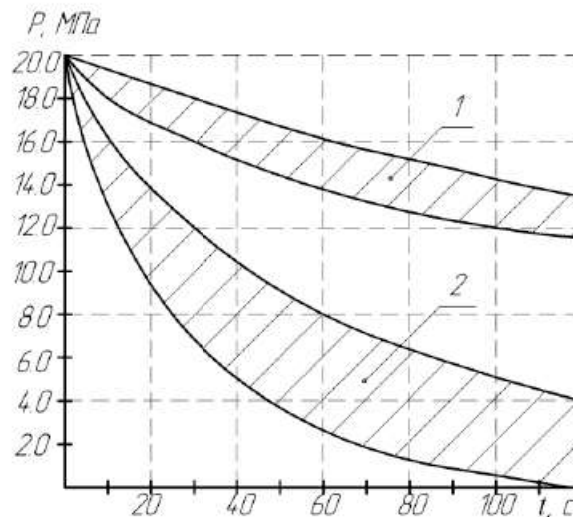
Важным параметром процесса изнашивания распылителя форсунки является гидроплотность прецизионных пар, согласно ГОСТ 10579-2017.

Изнашивание направляющей части распылителей форсунки приводит к потере гидроплотности сопряжения, утечкам топлива, снижению давления впрыска и сопутствующего этому нарушению процесса горения топлива, потерям теплоты в процессе сгорания. Изнашивание запорного сопряжения распылителя приводит к нарушению герметичности сопряжения, прорыву, образовавшихся продуктов горения в полость распылителя и, как следствие, к закоксовыванию отверстий.

Уплотняющую способность направляющего прецизионного сопряжения и герметичность запорного сопряжения определяют испытаниями на гидроплотность [52,135].

В работах В.В. Антипова, проводившего испытания на гидроплотность 40 изношенных распылителей и 10 новых, только 10% из них отвечают техническим условиям, у 32% распылителей плотность равна нулю вследствие утечек топлива вдоль иглы и запорной части распылителя [5].

Проведенные им сравнительные испытания динамики изменения гидроплотности изношенных и новых распылителей представлены на диаграмме (Рис. 1.2).



1 – новые распылители; 2 – изношенные распылители.

Рисунок 1.2 – Гидроплотность новых и изношенных распылителей

Анализ, представленных графиков (Рис.1.2) показывает, что изменение гидроплотности новых распылителей незначительно отличается от линейной

зависимости, в то время как гидроплотность изношенных распылителей можно описать гиперболической зависимостью.

Падение давления по времени для новых прецизионных пар в несколько раз меньше по абсолютной величине, чем изношенных.

Исследователями [17,19,21,79] установлено, что герметичность распылителей снижается вследствие износа запорного конуса иглы и седла корпуса распылителя, а также за счет увеличения зазора в направляющей части иглы.

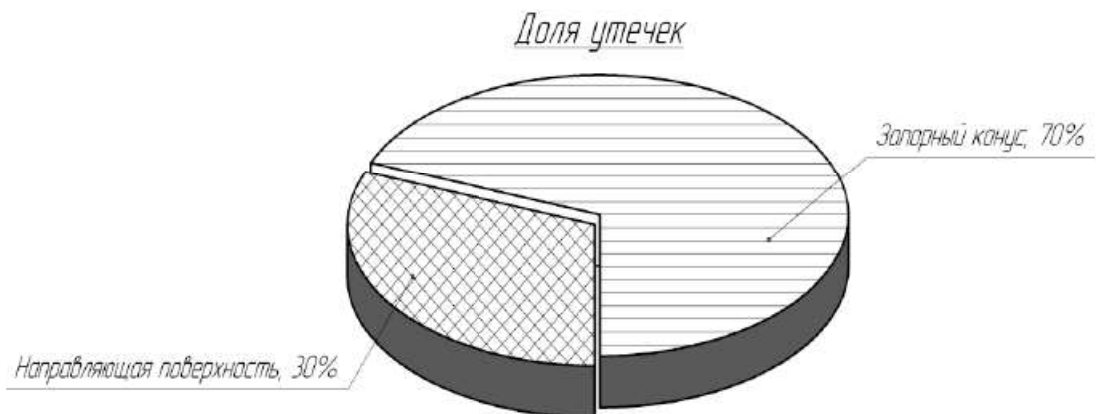


Рисунок 1.3 – Диаграмма распределения утечек топлива изношенных распылителей форсунок закрытого типа.

В представленной диаграмме (Рис.1.3) указаны распределения усредненных долей утечек топлива при опрессовке 100 изношенных распылителей форсунок закрытого типа от общей величины утечек. Из них 70% теряют герметичность в запорной части и 30% вследствие увеличения зазора в 2 – 2,5 раза в направляющей части иглы.

При длительных эксплуатационных испытаниях распылителей форсунок с гидравлически управляемым запорным клапаном и анализе гидроплотности, было установлено [19], что в начале эксплуатации при наработке первых 100 – 300 мото-часов гидроплотность возрастает в среднем на 30 – 45% от исходной.

Повышение гидроплотности распылителей форсунок в начале эксплуатации объясняется приработкой поверхностей сопряженных деталей распылителя и в том числе герметичности запорных поверхностей. Процесс

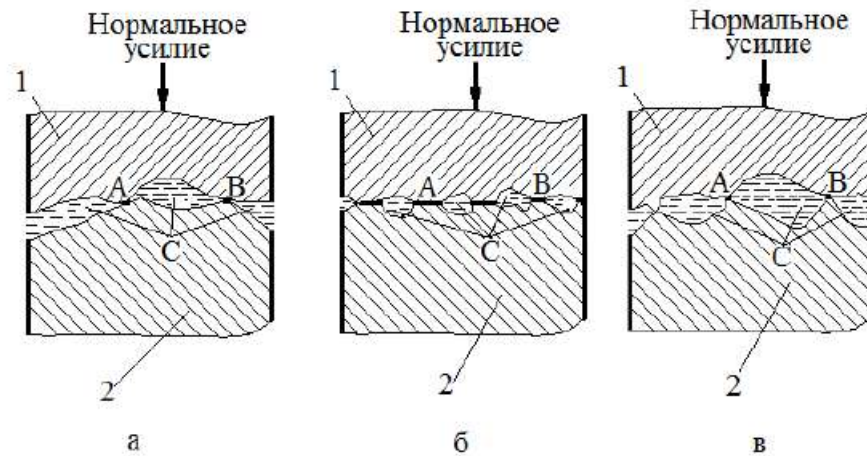
приработки поверхностей деталей распылителя протекает в течение 200 – 400 мото-часов. Затем в период работы от 450 до 1500 мото-часов гидроплотность постепенно снижается, так как появляется износ поверхностей запорного сопряжения и начальное разрушение направляющей поверхности иглы и сопряженного с ней отверстия корпуса распылителя.

После наработки распылителей форсунок 1800 – 2000 мото-часов наступает резкое снижение гидроплотности, появляется подтекание топлива в распылителях. К этому времени рабочие поверхности иглы и корпуса распылителя имеют значительный износ, особенно износ поверхностей запорного сопряжения «игла – корпус распылителя» форсунки, вследствие высокого действия ударной нагрузки.

1.2 Оценка ресурса материалов прецизионных пар распылителей в углеводородных жидкостях

Изменение структуры материалов поверхностей сопрягаемых деталей распылителя форсунки происходит по трём стадиям: приработка, нормальная эксплуатация, аварийный износ.

Первая стадия - в процессе изготовления прецизионных пар, поверхности запорного устройства (иглы) и седла корпуса распылителя имеют микронеровности (шероховатость). При комплектации прецизионных пар распылителя, выступы и впадины микронеровностей конусных поверхностей иглы и седла соприкасаются между собой, образуя посадочный зазор, величина которого от 2,0 до 4 мкм (Рис.1.4а).



«А, В» – точки контакта иглы и седла корпуса распылителя; «С» – слой топлива; «а» – начальный период эксплуатации сопряжения; «б» – период нормальной эксплуатации сопряжения; «в» – период аварийного изнашивания сопряжения.

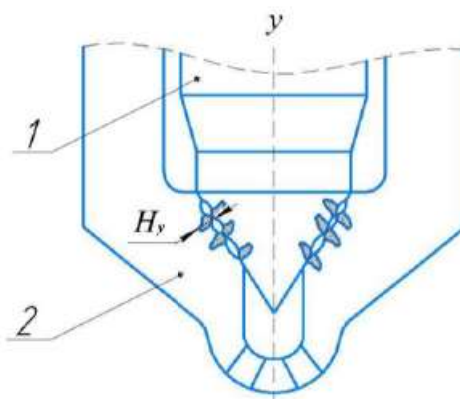
Рисунок 1.4 – Схема контакта в сопряжении «игла – корпус распылителя» форсунки

Интенсивность изнашивания определяется числом дискретных, случайно расположенных площадок по поверхности фактического контакта.

Фактическая поверхность контакта между иглой и корпусом распылителя, в условиях приработки, составляет сотые доли от размера геометрической поверхности контакта. При этом, в процессе контакта иглы возникают напряжения, превышающие предел пластичности материала, что приводит к пластическому деформированию микронеровностей в точках контакта. Таким образом, основная часть энергии удара расходуется на пластическую деформацию микронеровностей. Кроме того, часть энергии контакта расходуется на вытеснение из зазора топлива и на преодоление упругости поверхностных слоёв топлива. Часть подводимой энергии удара накапливается в поверхностном слое, что приводит к образованию и развитию дефектов кристаллической решётки. Износ микронеровностей иглы и посадочного места, приводит к уменьшению зазора между сопрягаемыми деталями, увеличению фактической площади контакта и нарушению герметичности уплотняющего сопряжения распылителя [5].

Вторая стадия – этап нормальной эксплуатации распылителя форсунки на приработанном сопряжении (Рис.1.4б). В этом случае проходное сечение между запорным устройством и седлом минимально, а фактическая площадь контакта и гидроплотность запорного конуса распылителя максимальна. В точках контакта при ударе иглы, наряду с пластическими напряжениями возникают и упругие. Величина пластических деформаций существенно ниже, чем на этапе приработки, а энергия удара, в основном, идет на упругие деформации. Зазор в сопряжении и фактическая площадь контакта изменяются не значительно, а гидроплотность сопряжения достигает максимального значения.

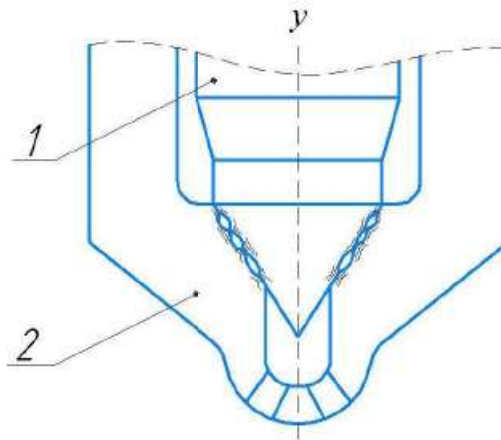
На второй стадии продолжается накопление энергии в поверхностном слое, количество дефектов кристаллической решётки увеличивается, образуются микротрещины, которые не выходят на поверхность и не вызывают существенного изменения микрогеометрии поверхностей и, как следствие, проходное сечение между соударяющимися деталями запорного сопряжения меняется незначительно. Гидроплотность распылителя на приработанном сопряжении максимальна. В результате накопления энергии при одиночном ударе иглы о седло в точках контакта в тонком слое $H_y = 20...60$ мкм возникают контактные напряжения (Рис.1.5).



1 – игла; 2 – седло корпуса распылителя; H_y – толщина поверхностного слоя, накапливающего напряжения удара.

Рисунок 1.5 – Эпюра контактных напряжений конусной поверхности сопряжения «игла – корпус распылителя форсунки»

При увеличении циклической нагрузки в этих же точках под воздействием контактных напряжений возникают микротрещины, не выходящие на поверхность деталей (Рис.1.6).



1 – игла; 2 – седло корпуса распылителя форсунки.

Рисунок 1.6 – Схема процесса формирования микротрещин в поверхностном слое сопряжения «игла-корпус распылителя форсунки»

Третья стадия - аварийный износ, характеризуется накоплением в поверхностном слое энергии до критического значения, равного энергии активации износа, что приводит к значительному увеличению контактных напряжений, это сопровождается увеличением размеров трещин, при этом трещины выходят на поверхность. Происходит отслоение значительной части поверхностного слоя, с образованием углублений (местных износов). Следствием этого является изменение микрогеометрии поверхности, а также увеличение проходного сечения и снижение гидроплотности распылителей форсунок [83,86].

Процесс изнашивания деталей распылителя форсунки на третьей стадии показан на схеме (Рис.1.4в).

Таким образом, изнашивание деталей и изменение проходного сечения распылителя характеризуется упругим и пластическим течением материала деталей и отделением его от контактирующей поверхности.

1.3 Требования к устройствам подачи топлива. Критерии работоспособного состояния.

Распылители форсунок, при заданном давлении и законе впрыскивания, должны обеспечить необходимую продолжительность впрыскивания, тонкость и равномерность распыливания, форму и дальность топливного факела и т.п., для обеспечения требуемой интенсивности испарения топлива, вовлечения его паров в диффузионный процесс смешивания с воздухом, самовоспламенения и, как следствие, наиболее полного сгорания топлива в камере сгорания двигателя.

Процесс впрыска топлива зависит от значительного числа факторов и, в первую очередь, от конструктивных особенностей распылителя: количества распыливающих отверстий; давления впрыскивания; гидроплотности и герметичности прецизионных сопряжений. Так же, процесс впрыска зависит от эксплуатационных свойств топлива.

Распылители форсунок выполняют следующие функции [17,28,50]:

- равномерное распределение топлива в объёме камеры сгорания;
- дисперсность распыливания топлива, которая характеризуется мелкими и однородными каплями;

Согласно исследованию [50], ресурс распылителей дизельных ДВС мобильных энергетических средств (МЭС) должен составлять не менее 1/2 ресурса форсунок, (не менее 3500 мото-часов).

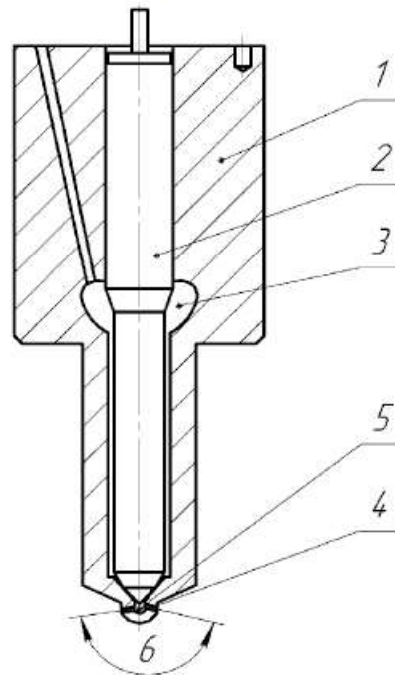
Выполнение, предъявляемых к распылителям требований, в значительной степени зависит от состояния и функционирования конструктивных элементов: направляющего (цилиндрического) и запорного (конического) сопряжений, распыливающих отверстий, а также состояния функциональных элементов форсунки, обеспечивающих работу распылителя.

В настоящее время 90...95% отечественных и зарубежных ДВС оснащены форсунками закрытого типа с многоструйными распылителями и гидравлически управляемой иглой [31,52,91,136]. Диаметры отверстий в

распылителях составляют 0,15...0,8 мм, а количество отверстий от 2 до 8.

В конструкцию распылителя форсунки закрытого типа (Рис 1.7) входит гидравлически управляемый прецизионный запорный клапан (игла) 2. Игла является запирающим конструктивным элементом и герметизирует магистраль высокого давления по конической поверхности уплотняющего сопряжения. Подъем иглы в распылителях форсунок дизельных ДВС составляет 0,2...1,3 мм [52,95,96]. Диаметр иглы распылителя форсунки в составляет от 4 до 10 мм. Функцию смазки прецизионных сопряжений распылителя и отвод тепла обеспечивает дизельное топливо.

Конструкция форсунки закрытого типа с многоструйными распылителями и гидравлически управляемой иглой предусматривает:



1 – корпус распылителя; 2 – запорный клапан распылителя (игла); 3 – карман; 4 – сопловые отверстия; 5 – предсопловый канал (колодец); 6 – угол между сопловыми отверстиями.

Рисунок 1.7 – Схема типового многоструйного распылителя форсунки закрытого типа и гидравлически управляемой иглой

Недостатками форсунок закрытого типа является:

- подвисание и прихватывание иглы форсунок;
- пластическая деформация металла запорного конуса распылителя;
- изменение упругости пружины;
- закоксовывание распыливающих отверстий;
- нарушение соосности иглы с корпусом распылителя;
- износ по торцам всех сопряжений форсунки;
- снижение давления впрыска, против нормативов.

В процессе работы распылителей форсунок происходит уменьшение давления топлива в моменты начала и конца подачи по причине воздействия давления газов в цилиндре двигателя, что приводит к ухудшению мощностных и экономических показателей дизельного двигателя [58].

Таким образом, из проведенного анализа литературных источников процесса изнашивания следует, что основным критерием работоспособного состояния является гидроплотность конусной поверхности сопряжения «игла – корпус распылителя» форсунки.

1.4 Анализ способов обеспечения работоспособного состояния прецизионных деталей топливной аппаратуры

Анализ исследований [4,6,58,137,149] показал, обеспечение работоспособного состояния распылителей форсунок обеспечивается конструктивными, технологическими и эксплуатационными способами, классификация которых приведена ниже (Рис.1.8.):



Рисунок 1.8 – Способы обеспечения работоспособного состояния прецизионных сопряжений распылителей форсунок

1.4.1 Конструкционные способы обеспечения работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок

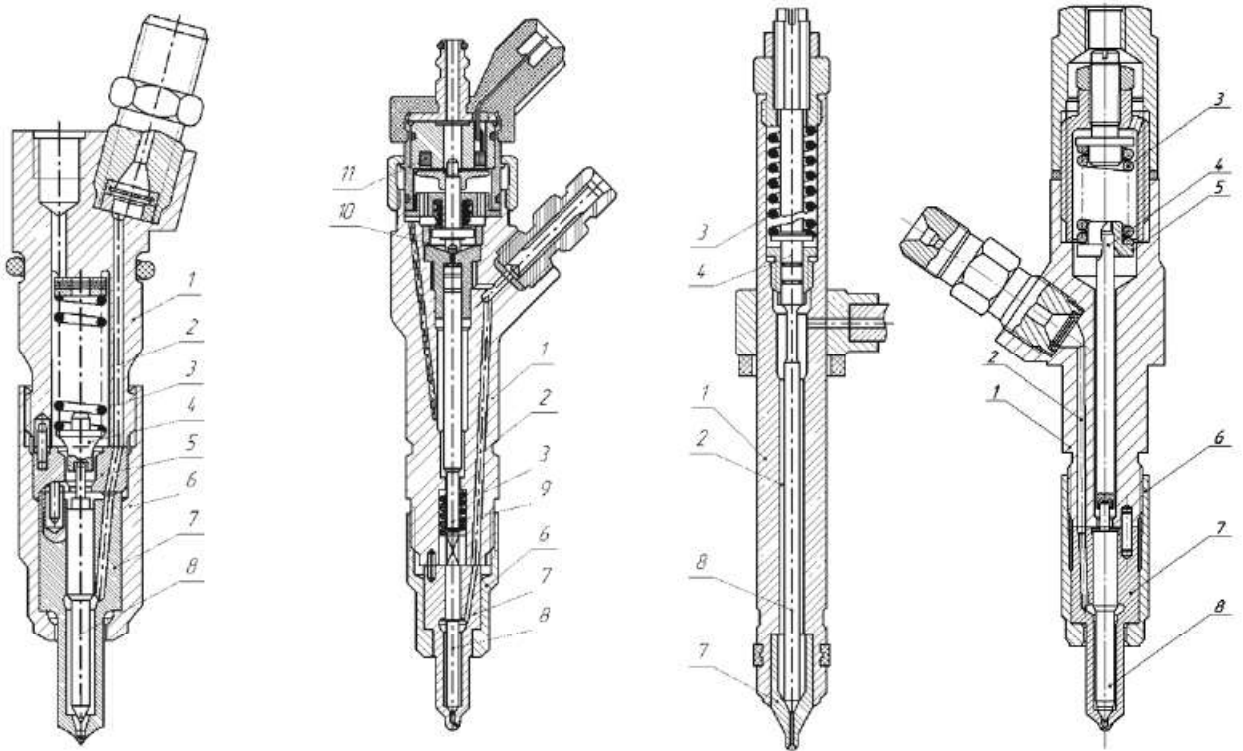
Способ направлен на изменение конструкции распылителей форсунок для компенсации динамических нагрузок. При разработке конструкции особое внимание уделяется выбору материала сопряжения, при этом учитывают, что работоспособное состояние деталей распылителя определяется твердостью материала.

Для изготовления деталей распылителя форсунок ФД-22 используют стали следующих марок:

- корпус распылителя сталь марки 18Х2Н4ВА по ГОСТ 4543;
- «игла» сталь марки Р-18 по ГОСТ 19265.

Твердость поверхности корпуса распылителя - HRC57, твердость «иглы» - HRC 60 [50].

Ниже приведены основные конструктивные схемы форсунок с многоструйным распылителем и гидравлически управляемой иглой автотракторных ДВС (Рис. 1.9) [58].



- 1 – корпус форсунки; 2 – канал для подвода топлива; 3 – пружина запирания иглы распылителя форсунки; 4 – штанга; 5 – проставка;
 6 – гайка распылителя форсунки; 7 – корпус распылителя форсунки;
 8 – игла распылителя форсунки; 9 - мультипликатор запирания;
 10 – шариковый управляющий клапан; 11 – электромагнит.

Рисунок 1.9 – Конструкции форсунок закрытого типа автотракторных дизелей: а – форсунка ЯЗДА; б – форсунка фирмы R. Bosch; в – форсунка фирмы Rikardo; г – форсунка ФД-22 тракторов МТЗ.

В форсунке закрытого типа с многоструйным распылителем и гидравлически управляемой иглой (Рис. 1.9а), используемой на двигателях типа ЯМЗ, длина штанги уменьшена до размера, позволяющего уменьшить

массу подвижных деталей форсунки, это снижает динамические и кинематические нагрузки на распылитель.

В закрытой форсунке фирмы R.Bosch (Рис. 1.9 б) гидравлическое управление подъёмом иглы заменено электромагнитным. Это позволяет увеличить давление перед распылителем до 160 МПа и обеспечить качество распыливания топлива.

Прецизионная часть иглы форсунки фирмы Rikardo (Рис.1.9 в), вынесена и расположена выше уровня точки подвода топлива к форсунке, что позволяет уменьшить: диаметр прецизионной части до 4 мм; диаметр запирающего конуса до 2 мм.

Основной форсункой, используемой на ДВС отечественного производства, является закрытая форсунка типа ФД-22 (Рис. 1.9 г). Корпус и игла распылителя форсунки ФД-22 изготовлены из легированной стали и являются прецизионной парой. Разукомплектовывание пары не предусмотрено.

В работах [58] предложена конструкция беспрецизионного клапанного механизма. В этой конструкции снижена инерционная масса деталей за счёт использования открывающегося потока дизельного топлива.

Однако совершенствование конструкции форсунки не позволил изменить условия, способствующие обеспечению необходимого ресурса распылителей. Кроме того эти способы можно осуществлять только при проектировании и изготовлении деталей распылителя.

1.4.2 Технологические способы обеспечения работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок

В практике эксплуатации форсунок автотракторных ДВС для обеспечения работоспособного состояния используются способы изменения структуры материала пар контактирующих деталей, а именно цементация и азотирование.

Цементация – обработка металлов с насыщением углеродом поверхностного слоя. Глубина цементации деталей 1–1,5 мм. Процесс цементации заключается в нагревании материала до температуры 850 – 950⁰С при этом атомарный углерод насыщает поверхностный слой, что приводит к упрочнению. К недостаткам процесса цементирования следует отнести длительность процесса цементации (15 ч), и его скорость (0,1 мм/ч).

Азотирование - процесс при насыщении азотом поверхностного слоя стальных деталей. Азотирование проводится при температурах 500-600⁰С в среде с высоким содержанием аммиака. Азотированию подвергают детали из легированных сталей. Глубина азотирования 0,02...0,05 мм. Азотирование повышает износостойкость деталей в 1,5 – 2 по сравнению с цементацией.

Недостатком процесса азотирования является повышенная хрупкость материала деталей.

Процессы цементации и азотирования в условиях ремонтной службы АПК производить сложно вследствие, отсутствия специализированного технологического оборудования.

1.4.3 Эксплуатационные способы обеспечения работоспособного состояния прецизионных сопряжений деталей распылителей форсунок

Одним из направлений обеспечения работоспособного состояния прецизионных сопряжений распылителей форсунок являются эксплуатационные методы.

Ресурс прецизионных сопряжений зависит от эксплуатационных свойств дизельного топлива [21, 55, 94, 111].

В настоящее время в Российской Федерации производятся летние и зимние дизельные топлива, ГОСТ 305 [38]. Обеспечение эксплуатационных свойств дизельного топлива является низкое содержание (до 0,3%) противоизносных присадок.

В работах [26,24,67], для повышения износостойкости прецизионных сопряжений топливного насоса высокого давления (ТНВД) предлагается

использовать дизельные топлива с присадками, состоящими из эфиров жирных кислот растительных масел. Присутствие в дизельном топливе гетерогенных структур в виде органических веществ способствует изменению контактируемых нагрузок при взаимодействии поверхностей, что является предпосылками к увеличению ресурса прецизионных деталей [104].

Исследования, проведенные [24,67] показывают, что для обеспечения работоспособного состояния, в дизельное топливо добавляли присадки на основе жирных кислот растительных масел (в концентрации 50% от объема дизельного топлива).

В результате их применения ресурс прецизионных деталей распылителей увеличился с 1300 до 1600 мото-часов. Основа жирных кислот растительных масел способствует образованию окислов на поверхностях прецизионных деталей, что вызывает разрушение их поверхностного слоя и увеличение износа деталей. К тому же, применение жирных кислот растительных масел способствует увеличению кинематической вязкости дизельного топлива, что приводит к ухудшению качества распыла и необходимости подогрева топлива.

Кроме того, при большой концентрации растительных масел в дизельном топливе на поверхностях деталей прецизионных сопряжений образуется неустойчивый поверхностный слой, склонный к разложению.

Стандарт 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.

Для обеспечения работоспособного состояния и повышения износостойкости поверхностей прецизионных сопряжений, в топливо вводят присадки, содержащие карбоновые кислоты.

Из литературных источников [14,105,118,124,131,142] известно, что ресурс деталей можно повысить путем добавления компонентов растительных масел в концентрации от 0,01 до 2,9%. Источником

карбоновых кислот является растительные масла (преимущественно рапсовое масло).

Примером использования карбоновых кислот является применением в дизельном топливе присадки «Р» [64,146].

Таблица 1 – Трибологические исследования присадки «Р».

Топливо	Диаметр пятна износа, мкм по ГОСТ 9490
Топливо, содержащее 0,2% серы	0,3
Топливо, содержащее 0,05% серы	0,45
ДТ+0,01% присадки «Р»	0,4
ДТ+0,1% присадки «Р»	0,39

Из результатов в таблице 1 следует, что противоизносные свойства дизельного топлива с присадкой «Р» существенно изменяются, так диаметр пятна износа (ДПИ) при исследовании топлива в концентрации присадки «Р» 0,1% уменьшился с 0,45 до 0,2 мм.

Условия введения присадок в дизельное топливо.

При введении присадок в дизельное топливо должны выполняться следующие условия [67]:

- температура присадки должна быть в пределах +20...+40°C;
- температура топлива на 10–15°C выше чем его температура помутнения;
- отсутствие содержания воды в дизельном топливе.

Концентрация присадки в дизельном топливе рекомендована её изготовителем и варьируется в пределах от 0,3 до 3%. В то же время превышение концентрации присадок, относительно рекомендуемых значений, приводит к повышенному износу деталей прецизионных пар [157,76].

Коллоидная стабильность дизельного топлива с присадками обеспечивается с помощью перемешивания с использованием промышленных или мобильных смесителей и насосов. Коллоидная

стабильность дизельного топлива с присадками достигается после 2-3 циклов перекачек топлива с постоянным объёмом топливного резервуара. Способ компаудирования топлива присадками заключается в смешивании в топливной ёмкости штатными насосами под давлением $P = 5$ мПа, и температурой $20 \pm 5^\circ\text{C}$ [67]. В конструктивном исполнении смесители подразделяют на пассивные и активные, как правило встраиваемые в систему трубопроводов перегонки топлива.

Исследование [157] показывает, что при выборе растительных масел необходимо учитывать длину углеводородной цепи и степень ненасыщенности. При этом они подчёркивают, что, с увеличением степени ненасыщенности, противоизносные свойства увеличиваются сильнее, чем при увеличении углеводородной цепи. Льняное и талловые масла содержат в своём составе от 75 до 86% ненасыщенных кислот.

Анализ способов повышения ресурса прецизионных сопряжений распылителей форсунки показывает, что использование конструкционных, технологических и эксплуатационных методов не позволяет в полной мере решить задачу.

Есть и другие материалы, обладающие свойствами, но эти материалы малоизученны. Поэтому, исследования, направленные на обеспечение работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей применением присадки к дизельному топливу являются актуальными.

В настоящей работе предполагается исследовать возможность использования дизельного топлива легированного присадками, на основе таллового и льняного масел, для повышения износостойкости прецизионных сопряжений распылителей форсунок закрытого типа с гидравлически управляемым запирающим клапаном (иглой) автотракторных ДВС.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ РАБОТОСПОСОБНОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПАР РАСПЫЛИТЕЛЕЙ ФОРСУНОК ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

2.1 Аналитическая модель изменения зазора в сопряжении «игла – корпус распылителя» форсунки

Детали распылителей форсунок подвергаются нескольким видам механических нагрузок, вызывающих изменение зазора в прецизионных парах распылителей.

Основным фактором, вызывающим изменение зазора деталей распылителей форсунок дизельных двигателей, является усталостный износ.

Для оценки интенсивности изнашивания при усталостном износе используется зависимость:

$$\Delta S_h = C_1 \frac{(1 - \mu^2)}{E} \cdot P_a \left\{ \frac{k \cdot f \cdot P_c}{C_2 \sigma_0} \left[\frac{E}{(1 - \mu^2) P_c} \right]^{1-\beta} \right\}^t \cdot n, \quad (2.1)$$

где n – количество циклов;

$$C_1 = 1,2 \frac{\sqrt{v}}{k_2 \cdot v(v^2 - 1)};$$

$$C_2 = \left(\frac{R}{h_{max}} \right)^{\frac{v}{2v+1}} \left(\frac{b}{2} \right)^{\frac{1}{2v+1}} \left[\frac{0,75\pi}{k_2 v(v-1)} \right]^{\frac{2v}{2v+1}};$$

$$v = 0,2 \left(\frac{R_{max}}{R} \right)^{\frac{3}{2}};$$

$$b = \frac{1}{2(1 - k_p)^v};$$

$$\beta = \frac{1}{2v+1};$$

R_{max} - наибольшая высота микронеровностей профиля опорной кривой, м;

R - радиус кривизны вершины неровности, м;

P_a, P_c - номинальное и контурное давление, МПа;

N – нагрузка в контакте;

A_a, A_c - номинальная и контурная поверхность контакта, м²;

$$P_a = \frac{N}{A_a} \text{ - номинальная площадь контакта, м}^2;$$

$$P_c = \frac{N}{A_c} \text{ - контурная площадь контакта, м}^2;$$

k_p - коэффициент заполнения профиля поверхности;

f – коэффициент трения;

h_{max} - глубина погружения иглы в седло, м;

E - модуль упругости материала корпуса, МПа;

μ - коэффициент Пуассона.

Зависимость справедлива для линейного упругого насыщенного контакта, при этом $t = 1$.

f – коэффициент трения формулы (2.1) показал, что в моделях изменения зазора учитываются следующие факторы: нормальная нагрузка, действующая в сопряжении в момент удара, площадь контакта, кинетического циклического нагружения. В приведенной модели не учитывается изменение зазора, влиянием эксплуатационных свойств топлива, которые являются смазочным материалом прецизионных деталей распылителя и оказывают влияние на процесс изнашивания. С учётом формулы (2.1) предлагается зависимость, которая позволяет учесть влияние топлива с присадкой на изменение зазора деталей запорного сопряжения.

При теоретическом рассмотрении изменении зазора прецизионных сопряжений используется модель, включающая систему факторов, характеризующих внешние воздействия на поверхностные слои деталей, а также механические свойства поверхностных слоев (Рис.2.1).

*Параметры, характеризующие
поверхностные слои деталей*

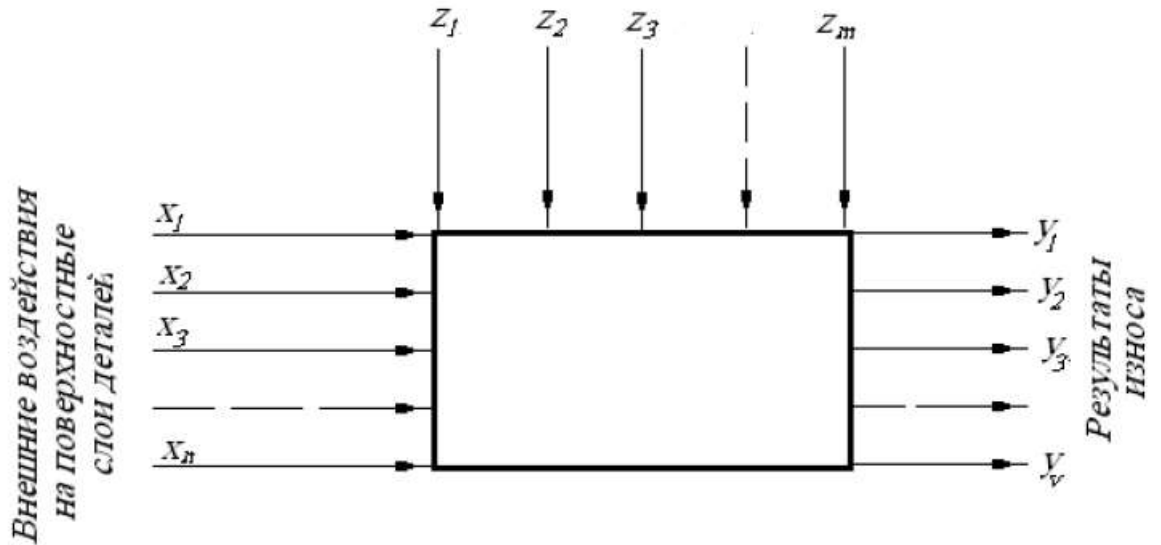
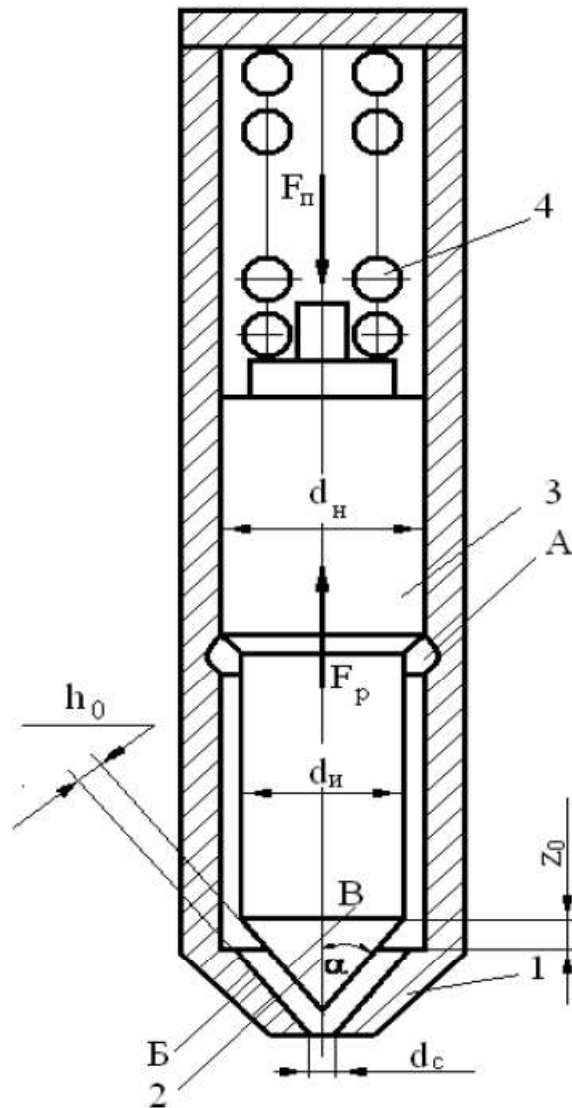


Рисунок 2.1 – Формализация физического процесса изменения зазора сопряжения «игла – корпус распылителя» форсунки.

Входные параметры, характеризующие изменение зазора сопряжения «игла - корпус распылителя» форсунки обозначены через $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, параметры, характеризующие внутреннюю структуру поверхностного слоя деталей, обозначены индексами $z_1, z_2, z_3, \dots, z_m$, и выходные параметры, характеризующие изменение зазора, обозначены индексами $y_1, y_2, y_3, \dots, y_v$.

В общем случае входными параметрами, воздействующими на поверхностный слой деталей, являются силовые и динамические нагрузки, свойства топлива и т.д.

Принципиальная схема распылителя форсунки с запорным клапаном «игла» распылителя форсунки имеет вид (Рис.2.2):



А – полость подвода топлива; Б, – поверхность контакта седла и иглы;
 В – полость пружины; 1- корпус распылителя; 2 – запорный конус иглы
 распылителя; 3 – направляющая часть иглы распылителя;
 4 – пружина форсунки.

Рисунок 2.2 – Схема нагрузочных и геометрических параметров распылителя при ударной нагрузке

Возвратно – поступательное движение иглы 2 в форсунке происходит под воздействием давления в полости «А», перемещающего иглу вверх, и открывающего отверстия для впрыска топлива. Перемещение иглы вниз осуществляется под воздействием пружины, в момент падения давления в полости «А». При этом происходит запираение отверстий и отсекается подача топлива в цилиндр двигателя. При перемещении иглы вниз возникает

кинетическая энергия иглы, которая, в момент посадки в стакан корпуса распылителя, превращается в энергию удара.

В результате многократно повторяющихся ударов иглы микрогеометрия поверхностей деталей сопряжения «игла-корпус распылителя» форсунки изменяется, что является причиной изменения величины проходного сечения, образованию утечек топлива.

2.2 Функциональная модель для определения ресурса распылителя форсунки

Изменение зазора (Рис.2.2) и гидроплотности прецизионных пар распылителей являются следствием воздействия кинетической энергии на запорный клапан «игла» в момент запираания, и зависит от:

- нагрузки на пружину форсунки;
- массы иглы;
- высоты подъёма иглы;
- количества циклов нагружения поверхности седла распылителя;
- прочностных свойств иглы и седла распылителя;
- микрогеометрии конусных поверхностей иглы и седла;
- эксплуатационных свойств топлива.

Оценку изменения зазора в сопряжении «игла-корпус распылителя» форсунки проведена на примере физической модели изнашивания (Рис.2.2).

При подаче топлива в цилиндр двигателя под действием давления топлива P в полости A запорный клапан «игла» поднимается на высоту Z_0 . При этом, деформация пружины составляет величину Z_0 . После отсечки топлива, запорный клапан перемещается под действием силы пружины F_{np} и силы собственного веса иглы G , и воздействует на седло 2 по образующей поверхности запорного конуса. При этом скорость иглы в момент касания запорного конуса равна 0.

При посадке иглы на седло корпуса, возникает энергия удара E_u . Из неё E_n - расходуется на пластическую деформацию поверхности деталей сопряжения, E_{yn} - расходуется на упругую деформацию микронеровностей, энергия E_T - расходуется на преодоление силы сопротивления топлива и E_n - накапливается в поверхностном слое соприкасающихся деталей.

Следовательно, суммарная энергия удара выразится зависимостью:

$$E_u = E_n + E_{yn} + E_m + E_n. \quad (2.2)$$

где E_n – энергия, расходуемая на пластическую деформацию поверхности сопряжения «игла – корпус распылителя» форсунки;

E_{yn} – энергия, расходуемая на упругую деформацию микронеровностей сопряжения «игла – корпус распылителя» форсунки;

E_m – энергия, расходуемая на преодоление силы сопротивления топлива;

E_n – энергия, накапливающаяся в поверхностном слое соприкасающихся деталей сопряжения «игла – корпус распылителя» форсунки.

Энергия удара иглы равна её кинетической энергии и определяется как:

$$E_u = \frac{m_u w^2}{2} = \frac{c z_0^2}{2}. \quad (2.3)$$

где m_u - масса иглы, кг;

w - скорость иглы в момент удара, м/с;

c – жесткость пружины, Н/м;

z_0 - высота подъема иглы распылителя, м.

Энергия, расходуемая на преодоление сопротивления топлива:

$$E_m = a \left[(p_1 \mathcal{G}_1 - p_2 \mathcal{G}_2) + \mathcal{G} \frac{\Delta \sigma^2}{2E} \right]. \quad (2.4)$$

где a – коэффициент пропорциональности;

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

$\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2$ – объём топлива в зазоре в начале и конце запираания форсунки, мм³;

\mathcal{G} – объём вытесненного топлива в процессе запираания форсунки, мм³;

$\Delta\sigma$ – изменение эквивалентного напряжения в материалах деталей, МПа;

E – модуль упругости материалов распылителя, МПа.

Энергия удара иглы, расходуемая на деформацию поверхностных слоёв деталей, определяется из уравнения:

$$E_u - E_m = \frac{m_u w^2}{2} - a \left[(p_1 \mathcal{G}_1 - p_2 \mathcal{G}_2) + \mathcal{G} \frac{\Delta\sigma^2}{2E} \right], \quad (2.5)$$

где m_u – масса иглы, кг;

w – скорость иглы в момент удара, м/с;

a – коэффициент пропорциональности;

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

$\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2$ – объём топлива в зазоре в начале и конце запираания форсунки, мм³;

\mathcal{G} – объём вытесненного топлива в процессе запираания форсунки, мм³;

$\Delta\sigma$ – эквивалентное напряжение в материале деталей распылителя, МПа;

E – модуль упругости материала деталей распылителя, МПа.

Преобразуя зависимость (2.5) с учётом (2.2) получено:

$$\frac{m_u w^2}{2} - a \left[(p_1 \mathcal{G}_1 - p_2 \mathcal{G}_2) + \mathcal{G} \frac{\Delta\sigma^2}{2E} \right] = E_n + E_{ym} + E_n. \quad (2.6)$$

где m_u – масса иглы, кг;

w – скорость иглы в момент удара, м/с;

a – коэффициент пропорциональности (0,000986 - 0,002);

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

$\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2$ – объём топлива в зазоре в начале и конце запираения форсунки, мм³;

\mathcal{G} – объём вытесненного топлива в процессе запираения форсунки, м³;

$\Delta\sigma$ – изменение эквивалентного напряжения, МПа;

E – модуль упругости материала деталей распылителя, Па. (в пределах $(21...22) \cdot 10^{10}$ Па);

E_n – энергия удара иглы, расходуемая на пластическую деформацию поверхности деталей;

E_{yn} – энергия иглы, расходуемая на упругую деформацию поверхности деталей;

E_n – энергия удара иглы, накапливаемая в соударяющихся деталях.

В результате единичного соударения запорного клапана «иглы» и «седла корпуса» распылителя происходит деформация микронеровностей поверхностного слоя деталей, на величину λ .

E_n и E_{yn} в уравнении (2.6) равны работе, затрачиваемой на упругую деформацию микро и макроструктуры соударяющихся деталей и изменение проходного сечения.

Энергия, затрачиваемая на пластическую и упругую деформацию деталей распылителя, определяется как:

$$E_{\partial} = E_n + E_{yn}. \quad (2.7)$$

E_n вызывает изменение площади проходного сечения в результате пластической деформации поверхностей деталей сопряжения «игла – корпус распылителя» форсунки. E_{yn} вызывает изменение площади проходного сечения в результате упругой деформации поверхностей деталей сопряжения.

В общем виде, скорость иглы в момент удара определяется дифференциальным уравнением:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{cz_0}{m_u} + g + f \rightarrow 0, \quad (2.8)$$

где $\frac{cz_0}{m_u}$ - ускорение иглы, создаваемое пружиной, м/с²;

g - ускорение иглы под действием силы тяжести, м/с²;

f - ускорение, создаваемое в результате действия на иглу поверхностного слоя топлива.

при условии: при $t = 0$ $dz/dt = w = 0$, $z = z_0$.

В результате интегрирования и преобразований, выражение для скорости изменения зазора между конусными поверхностями иглы и корпуса распылителя определяется зависимостью:

$$\frac{dz}{dt} = w_z = \left(\frac{cz_0}{m_u} + g + f \right) t, \quad (2.9)$$

тогда время, в течение которого игла проходит расстояние z_0

$$t_y = \sqrt{\frac{z_0}{\frac{cz_0}{m_u} + g + f}}. \quad (2.10)$$

где z_0 - высота подъема иглы распылителя, м;

$\frac{cz_0}{m_u}$ - ускорение иглы, создаваемое пружиной, м/с²;

g - ускорение иглы под действием силы тяжести, м/с²;

f - ускорение, создаваемое в результате действия на иглу поверхностного слоя топлива.

Изменение площади проходного сечения в сопряжении «игла-корпус распылителя» форсунки на участке приработки определяется, как:

$$S^1 = l_k (h - \lambda). \quad (2.11)$$

где l_k - длина линии контакта в сопряжении «игла – корпус распылителя» форсунки, м;

h - зазор в сопряжении «игла – корпус распылителя» форсунки, м;

γ - величина деформация микронеровностей поверхностного слоя деталей распылителя.

Поскольку фактическая площадь контакта составляет $2/3$ от номинальной, то контактные напряжения сопоставимы с пределом прочности материалов деталей сопряжения «игла-корпус распылителя» форсунки.

Количество циклов нагружения материала:

$$N = k \cdot n \cdot t. \quad (2.12)$$

где k - переходной коэффициент, $k = 120$;

n - частота вращения коленчатого вала ТНВД, мин^{-1} ;

t – наработка, мин.

При контакте иглы с седлом корпуса распылителя, энергия удара приводит к рассеиванию тепла в поверхностном слое деталей. Износ поверхностного слоя деталей распылителя обусловлен усталостной прочностью материала. Кинетическая энергия, от действия иглы распылителя, вызывает зону наклепанного слоя металла на поверхности материала корпуса. Это приводит к разрушению поверхностного слоя металла корпуса.

Отношение накопленной энергии в поверхностном слое к энергии пластической и упругой деформации приняты как β , тогда доля кинетической энергии от действия иглы, накапливающейся в поверхностном слое материала $(1 - \beta)$. Таким образом:

$$L_{\partial} = E_n + E_{yn} = (1 - \beta) \cdot (E - E_m), \quad (2.13)$$

$$E_n = \beta(E - E_m). \quad (2.14)$$

где E_n – энергия удара иглы, расходуемая на пластическую деформацию поверхности деталей;

E_{yn} – энергия иглы, расходуемая на упругую деформацию поверхности деталей;

E_m – энергия удара иглы, накапливаемая в соударяющихся деталях.

$(1-\beta)$ – кинетическая энергия, накапливающейся в поверхностном слое материала деталей сопряжения «игла-корпус распылителя» форсунки.

Тогда, энергия упругой деформации поверхностных слоёв за время одного воздействия составляет:

$$E_n = (1-\beta) \left\{ \left(\frac{m_u w^2}{2} \right) - a \left[(\Delta P \mathcal{V}) + \mathcal{V} \frac{\Delta \sigma^2}{2E} \right] \right\}. \quad (2.15)$$

где $(1-\beta)$ – кинетическая энергия, накапливающейся в поверхностном слое материала деталей сопряжения «игла-корпус распылителя» форсунки.

m_u – масса иглы, кг;

w – скорость иглы в момент удара, м/с;

a – коэффициент пропорциональности ($a = 0,217$ для условия упругого контакта);

Δp , $\Delta \mathcal{V}$ – абсолютное давление, объём топлива в зазоре во время запираания форсунки, Па;

\mathcal{V} – объём вытесненного топлива в процессе запираания форсунки, м³;

$\Delta \sigma$ – изменение эквивалентного напряжения, Па;

E – модуль упругости топлива, Па. (находится в пределах $(21...22) \cdot 10^{10}$ Па).

За время работы форсунки t при числе воздействия запорного клапана иглы по седлу корпуса распылителя Z , изменение внутренней энергии составляет:

$$E_n = kn(1-\beta) \left\{ \left(\frac{m_u w^2}{2} \right) - a \left[(\Delta P \mathcal{V}) + \mathcal{V} \frac{\Delta \sigma^2}{2E} \right] \right\} t. \quad (2.16)$$

где k – переходной коэффициент, $k = 120$;

n – частота вращения коленчатого вала ТНВД, мин⁻¹;

$(1-\beta)$ – кинетическая энергия, накапливающейся в поверхностном слое материала деталей сопряжения «игла-корпус распылителя» форсунки;

m_u – масса иглы, кг;

w – скорость иглы в момент удара, м/с;

a – коэффициент пропорциональности ($a = 0,217$ для условия упругого контакта);

$\Delta p, \Delta \mathcal{V}$ – абсолютное давление, объём топлива в зазоре во время запираания форсунки, Па;

\mathcal{V} – объём вытесненного топлива в процессе запираания форсунки, м³;

$\Delta \sigma$ – изменение эквивалентного напряжения, Па;

E – модуль упругости топлива, Па. (находится в пределах $(21...22) \cdot 10^{10}$ Па);

t – наработка, мин.

При $E_n = E_0$, ресурс сопряжения «игла - корпус распылителя» форсунки определяется как:

$$t(p_1, p_2, \mathcal{V}_1, \mathcal{V}_2, \mathcal{V}) = \frac{E_0}{\frac{kn(1-\beta)}{\tau} \left\{ \frac{m_u w^2}{2} - a \left[(\Delta p \mathcal{V}) + \mathcal{V} \frac{\Delta \sigma^2}{2E} \right] \right\}}. \quad (2.17)$$

где k – переходной коэффициент, $k = 120$;

n – частота вращения коленчатого вала ТНВД, мин⁻¹;

$1 - \beta$ – доля кинетической энергии от действия иглы, накапливающейся в поверхностном слое материала;

m_u – масса иглы, кг;

w – скорость иглы в момент удара, м/с;

a – коэффициент пропорциональности, ($a = 0,217$ для условия упругого контакта);

$\Delta p, \Delta \mathcal{V}$ – абсолютное давление, объём топлива в зазоре во время запираания форсунки, Па· м³;

\mathcal{V} – объём вытесненного топлива в процессе запираания форсунки, м³;

$\Delta \sigma$ – изменение эквивалентного напряжения, Па;

E – модуль упругости топлива, Па;

причем $m; w; a; \mathcal{V} = \text{const}$;

2.3 Определение внутренней энергии поверхностных слоёв деталей распылителя форсунки

В слое контактирующих поверхностей деталей распылителя деформацию и контактные напряжения можно уменьшить за счёт улучшения свойств смазки дизельного топлива. Поскольку режим трения в сопряжении «игла-корпус распылителя» форсунки, в значительной мере, зависит от упругости контакта, и смазывающих свойств топлива, дизельное топливо с противоизносной присадкой способствует снижению контактного напряжения в зоне контакта деталей, что изменяет режим трения с сухого до граничного. Напряжения в контакте деталей σ определяется, как:

$$\sigma = \frac{P_H^y}{F_\phi}, \text{ Н/мм}^2, \quad (2.18)$$

где P_H - нормальная сила удара, Н;

F_ϕ – фактическая площадь контакта, мм²;

Номинальная площадь контакта деталей в сопряжении «игла-корпус распылителя» форсунки, определяется зависимостью:

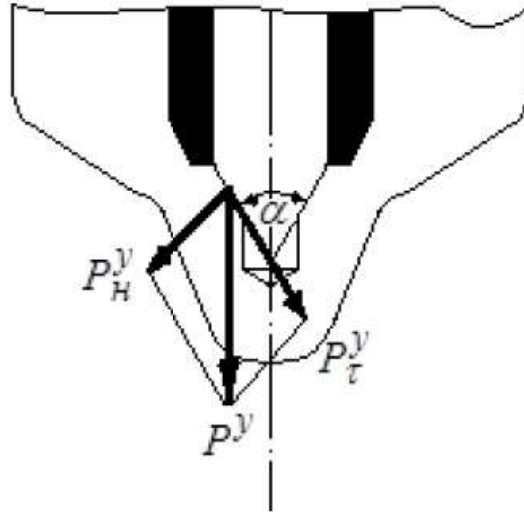
$$\bar{F}_H = \pi L(R + r), \quad (2.19)$$

где L – длина образующей заборного конуса иглы, мм;

R – большой радиус основания заборного конуса иглы, м;

r – малый радиус основания заборного конуса иглы, м.

Ударная нагрузка на иглу P_H определяется согласно схеме (Рис.2.3):



P_H^y – сила удара иглы; P_H^y, P_T^y – нормальная и тангенциальная составляющие силы удара соответственно.

Рисунок 2.3 – Вектор сил в сопряжении «игла-корпус распылителя» форсунки

Нормальная составляющая ударная нагрузка на иглу распылителя:

$$P_H^y = P_H^y \cos(90 - \frac{\alpha}{2}) = (cz_0 + m_u g) \cos(90 - \frac{\alpha}{2}). \quad (2.20)$$

где P_T^y – тангенциальная составляющая сила удара иглы;

a – коэффициент пропорциональности ($a = 0,217$ для условия упругого контакта);

c – жесткость пружины, Н/м;

z_0 – высота подъема иглы распылителя, м;

m_u – масса иглы, кг;

g – ускорение иглы под действием силы тяжести, м/с².

После подстановки формул (2.18) и (2.19) в формулу (2.20), получим:

$$\Delta\sigma = \frac{(cz_0 + m_u g) \cos(90 - \alpha / 2)}{\pi L(R + r)}, \quad (2.21)$$

где c – жесткость пружины, Н/м;

z_0 – высота подъема иглы распылителя, м;

m_u – масса иглы, кг;

g – ускорение иглы под действием силы тяжести, м/с²;

L – длина образующей заборного конуса иглы, мм;

R – большой радиус основания заборного конуса иглы, м;

r – малый радиус основания заборного конуса иглы, м.

Давление начала запираания определяем из баланса сил, действующих на конусную поверхность иглы:

$$p_1 \frac{\pi}{4} (D_{\partial}^2 - d_{\partial}^2) = cz_0 + m_u g, \quad (2.22)$$

где D_{∂}^2 , d_{∂}^2 - наружный и внутренний диаметры конусной поверхности иглы, м;

c – жесткость пружины, Н/м;

z_0 - высота подъема иглы распылителя, м;

m_u - масса иглы, кг;

g - ускорение иглы под действием силы тяжести, м/с².

Следовательно, из уравнения (2.22), получим:

$$p_1 = \frac{4(cz_0 + m_u g)}{\pi(D_{\partial}^2 - d_{\partial}^2)}, \quad (2.23)$$

где c – жесткость пружины, Н/м;

z_0 - высота подъема иглы распылителя, м;

m_u - масса иглы, кг;

g - ускорение иглы под действием силы тяжести, м/с²;

D_{∂}^2 , d_{∂}^2 - наружный и внутренний диаметры конусной поверхности иглы, м.

Объём v_1 определяется по формуле:

$$v_1 = \pi(D_{\partial}^2 - d_{\partial}^2)\Delta h_0, \quad (2.24)$$

где D_{∂}^2 , d_{∂}^2 - наружный и внутренний диаметры конусной поверхности иглы, м;

Δh_0 - ход иглы, м.

Таким образом, произведение $p_1 v_1$ с учётом формул (2.23) и (2.24) равно:

$$p_1 v_1 = 4h_0 (cz_0 + m_u g), \quad (2.25)$$

где h_0 - ход иглы, м;

c – жесткость пружины, Н/м;

z_0 - высота подъема иглы распылителя, м;

m_u - масса иглы, кг;

g - ускорение иглы под действием силы тяжести, м/с²;

Давление p_2 ниже давления впрыска, так как давление впрыска (p_1) находится в пределах 255...265 МПа.

Учитывая, ничтожность объёма топлива в запорном сопряжении при закрытом положении иглы следует предполагать, что произведением $p_1 v_1$ можно пренебречь.

Положим, что в момент времени $t = 0$ зазор имеет величину равную h_0 , то в результате величина λ изменяется до некоторого конечного значения h_{\max} .

При этом величина зазора будет равна:

$$h = \lambda - h_0, \text{ при } h \rightarrow \max \quad (2.26)$$

В этом случае уравнение, описывающее процесс изнашивания сопряжения «игла – корпус распылителя» форсунки, принимает вид:

$$\frac{dh}{dt} = h' \quad (2.27)$$

где h' – интенсивность изнашивания сопряжения, мм/с;

h – зазор в запорном сопряжении распылителя в момент времени t , мм;

t – наработка сопряжения, с.

Скорость изнашивания сопряжения зависит от параметров, определяющих механический износ в результате пластической деформации микронеровностей λ на поверхности деталей сопряжения, а также от усталостного разрушения, т.е.

$$h' = h'_1 + h'_2, \quad (2.28)$$

где h'_1 – интенсивность изнашивания микронеровностей, мм/с;

h'_2 – интенсивность изнашивания в результате усталостного разрушения, м/с.

Интенсивность изнашивания сопряжения в результате пластической деформаций микронеровностей на поверхности представим в виде:

$$h'_1 = -kh_1, \quad (2.29)$$

где k – коэффициент, характеризующий износостойкость материала, с^{-ε} ($10^5 \dots 10^{-12}$).

h_1 – интенсивность изнашивания микронеровностей, мм/с;

Уравнение (2.29) представим в виде дифференциала:

$$\frac{dh_1}{dt^\varepsilon} + kh_1 = 0. \quad (2.30)$$

где k – коэффициент, характеризующий износостойкость материала, с^{-ε} ($10^5 \dots 10^{-12}$);

h_1 – интенсивность изнашивания микронеровностей, мм/с;

t^ε – наработка при пластической деформации материала деталей.

Интегрируя уравнение (2.30) при начальном условии: при $t = 0$ $h_1 = h_0$.

В результате интегрирования уравнения (2.30) получено:

$$-kt^\varepsilon = \ln h_1 + C \quad (2.31)$$

где k – коэффициент, характеризующий износостойкость материала, с^{-ε} ($10^5 \dots 10^{-12}$);

t^ε – наработка при пластической деформации материала деталей;

h_1 – интенсивность изнашивания микронеровностей, мм/с;

C – экспериментальная постоянная.

Из начальных условий $\ln h_1 = -\ln h_0$

Следовательно, окончательно имеем - функциональная зависимость интенсивности изнашивания от пластической деформации:

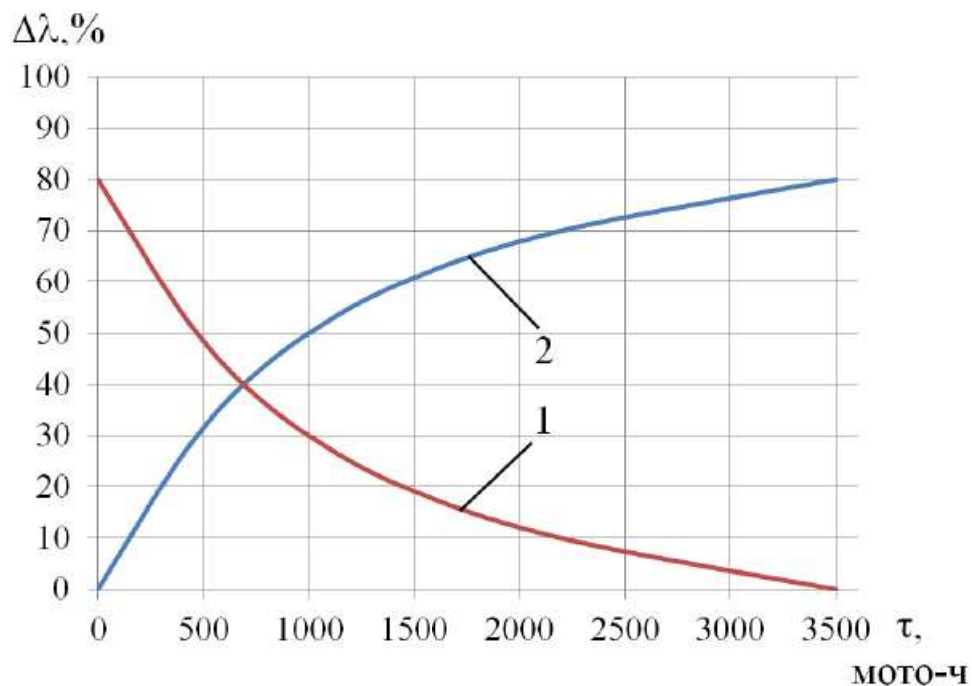
$$\ln \frac{h_1}{h_0} = -kt^\varepsilon, \text{ или } h_1 = h_0 e^{-kt^\varepsilon}, \quad (2.32)$$

где h_1 – интенсивность изнашивания микронеровностей, мм/с;
 h_0 – ход иглы, м;
 k – коэффициент, характеризующий износостойкость материала, $\text{с}^{-\varepsilon}$ ($10^{-5} \dots 10^{-12}$);
 t^{ε} – наработка при пластической деформации материала деталей;
 Величина λ характеризует действие пластической деформации в сопряжении, (2.26) и (2.32) определяются как:

$$\lambda = h_0 - h_0 e^{-k t^{\varepsilon}} = h_0 (1 - e^{-k t^{\varepsilon}}), \quad (2.33)$$

где h_0 – ход иглы, м;
 k – коэффициент, характеризующий износостойкость материала, $\text{с}^{-\varepsilon}$ ($10^{-5} \dots 10^{-12}$);
 t^{ε} – наработка при пластической деформации материала деталей.

На рисунке 2.4 представлены закономерности изменения кривых h и λ , в соответствии с зависимостями (2.32) и (2.33):



1 - изменение зазора h ; 2 - величина пластической деформации.

Рисунок 2.4 – Закономерности изменения зазора h и деформации металла λ .

Величина зазора в поверхностном слое детали определяется как:

$$h'(t)_2 = \frac{dh}{dE_n} \frac{dE_n}{dt}, \quad (2.34)$$

где $\frac{dh}{dE_n}$ – интенсивность изнашивания сопряжения в зависимости от кинетической энергии иглы в поверхностном слое, мкм/Вт;

$\frac{dE_n}{dt}$ – скорость накопления внутренней энергии, Вт/с.

Процесс изнашивания позволяет предположить, что изменение величины зазора в сопряжении «игла – корпус распылителя» форсунки возможен по линейному закону в связи с условиями линейного накопления повреждений в металле. т.е. $h = \gamma E_n$.

В этом случае:

$$\frac{dh}{dE_n} = \gamma, \quad (2.35)$$

где E_n – энергия удара иглы, накапливаемая в соударяющихся деталях;

γ – коэффициент пропорциональности, определяющий изменение зазора на единицу прироста внутренней энергии, (м·моль)/кДж.

С учётом (2.3), (2.17) уравнение (2.35) принимает вид:

$$\int_{h_0}^h dh = \int_0^t kn(1-\beta)\gamma \left\{ \left(\frac{cz_0^2}{2} \right) - a \left[(\Delta\Delta p \mathcal{G}) + \mathcal{G}_0 \frac{\Delta\sigma^2}{2E} \right] \right\} t dt, \quad (2.36)$$

где h – зазор в запорном сопряжении распылителя в момент времени t , мм;

h_0 – ход иглы, м;

k – коэффициент пропорциональности ($k = 120$);

$(1-\beta)$ – доля кинетической энергии от действия иглы, накапливающейся в поверхностном слое материала;

γ – коэффициент пропорциональности, определяющий изменение зазора на единицу прироста внутренней энергии, (м·моль)/кДж.;

c – жесткость пружины, Н/м;

z_0 - высота подъема иглы распылителя, м;

a – коэффициент пропорциональности;

$\Delta p \Delta \mathcal{G}$ – абсолютное давление, объём топлива в зазоре во время запираания форсунки, мПа;

\mathcal{G} – объём вытесненного топлива в процессе запираания форсунки, м³;

$\Delta \sigma$ – изменение эквивалентного напряжения, мПа;

E – модуль упругости топлива, мПа.

Интегрируя левую часть уравнения (2.37) от h_0 до h , а правую от 0 до t , получим:

– функциональная модель интенсивности изнашивания в результате накопления энергии:

$$h_2 = k n (1 - \beta) \gamma \left\{ \frac{c z_0^2}{2} - a \left[(\Delta p \Delta \mathcal{G}) + \mathcal{G}_0 \frac{\Delta \sigma^2}{2E} \right] \right\} t^2, \quad (2.37)$$

где k – коэффициент пропорциональности ($k = 120$);

n – частота вращения коленчатого вала ГНВД, мин⁻¹;

$(1 - \beta)$ – доля кинетической энергии от действия иглы, накапливающейся в поверхностном слое материала;

γ – коэффициент пропорциональности, определяющий изменение зазора на единицу прироста внутренней энергии, (м·моль)/кДж.;

c – жесткость пружины, Н/м;

z_0 - высота подъема иглы распылителя, м;

a – коэффициент пропорциональности;

$\Delta p \Delta \mathcal{G}$ – абсолютное давление, объём топлива в зазоре во время запираания форсунки, мПа;

\mathcal{G} – объём вытесненного топлива в процессе запираания форсунки, м³;

$\Delta \sigma$ – изменение эквивалентного напряжения, мПа;

E – модуль упругости топлива, мПа.

Суммарный зазор в сопряжении «игла - корпус распылителя» форсунки в результате пластической деформации и накопления внутренней энергии:

$$h = h_0 e^{-kt^\varepsilon} + k n(1-\beta)\gamma \left\{ \frac{cz_0^2}{2} - a \left[(\Delta p \Delta \mathcal{G}) + \mathcal{G}_\partial \frac{\Delta \sigma^2}{2E} \right] \right\} t^2, \quad (2.38)$$

где $h_0 e^{-kt^\varepsilon}$ - величина пластической деформации в сопряжении «игла-корпус распылителя» форсунки, мкм;

n - частота вращения коленчатого вала ТНВД, мин⁻¹;

$(1-\beta)$ - доля кинетической энергии от действия иглы, накапливающейся в поверхностном слое материала;

γ - коэффициент пропорциональности, определяющий изменение зазора на единицу прироста внутренней энергии, (м·моль)/кДж.;

c - жесткость пружины, Н/м;

z_0 - высота подъема иглы распылителя, м;

a - коэффициент пропорциональности;

$\Delta p \Delta \mathcal{G}$ - абсолютное давление, объём топлива в зазоре во время запираания форсунки, мПа· м³;

\mathcal{G}_∂ - объём вытесненного топлива в процессе запираания форсунки, м³;

$\Delta \sigma$ - изменение эквивалентного напряжения, мПа;

E - модуль упругости топлива, мПа.

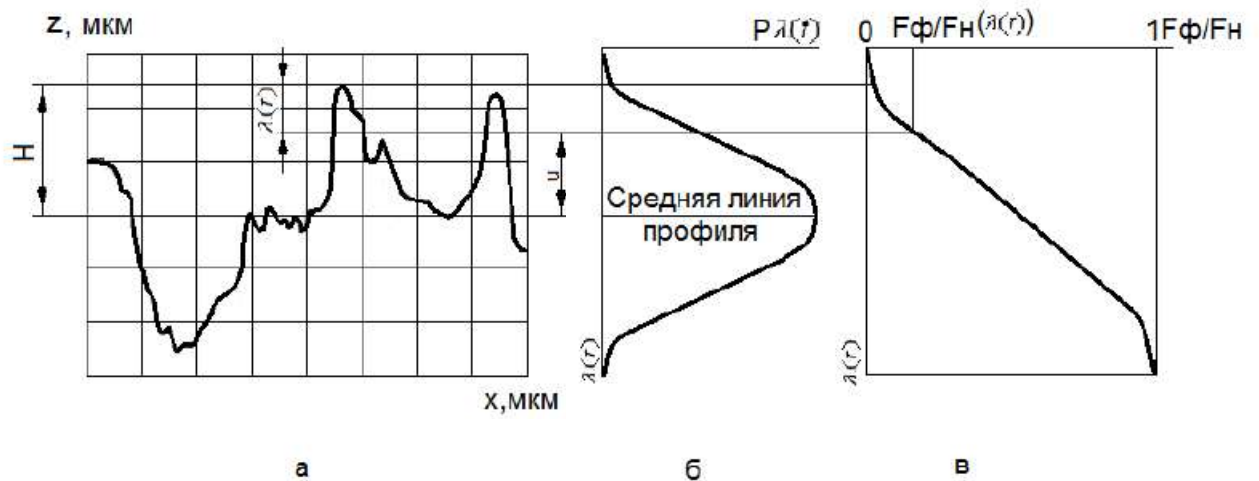
При определении величины ν_∂ предполагается, что объём деформированного металла в поверхностном слое равен произведению фактической площади контакта на глубину влияния деформации, при этом использована следующая зависимость:

$$\nu_\partial = F_\phi \cdot h_\partial. \quad (2.39)$$

где F_ϕ - фактическая площадь контакта поверхности корпуса распылителя, м²;

h_∂ - глубина влияния деформации в местах контакта микронеровностей, м.

Согласно [126], по мере износа фактическая площадь контакта в зависимости от износа λ изменяется по нормальному закону (Рис. 2.5). Входящую в зависимость (2.39), площадь фактического контакта определена, как значение площади на приработанном участке.



а – профиль поверхности; б – опорная поверхность; в – отношение фактической поверхности контакта к номинальной F_{ϕ} / F_n .

Рисунок 2.5 – Схема определения фактической площади контакта.

Зависимость (2.35), для определения λ , позволяет оценить величину пластической деформации микронеровностей.

Уравнение, определяющее площадь опорной поверхности, имеет вид:

$$F_{\phi} = \left[0,5 - \Phi_0 \left(\frac{u}{\sigma} \right) \right] F_n, \quad (2.40)$$

где $\Phi_0 \left(\frac{U}{\sigma} \right)$ – значение функции в интеграле Лапласа;

F_n – номинальная площадь контакта, м^2 ;

u – величина износа, мкм;

σ – среднеквадратичное отклонение высоты микронеровностей, м.

Выразим величину износа u через λ , согласно схеме (Рис. 2.5):

$$u = H_{\max} - \lambda, \quad (2.41)$$

где H_{\max} – максимальная величина микронеровностей на поверхности иглы и корпуса распылителя;

λ – величина пластической деформации в сопряжении, мкм.

В этом случае формула (2.42) с учётом формулы (2.41) примет вид:

$$F_{\phi} = \left[0,5 - \Phi_0 \left(\frac{H_{max} - h_0(1 - \exp(-kt^e))}{\sigma} \right) \right] F_H, \quad (2.42)$$

где $\Phi_0\left(\frac{U}{\sigma}\right)$ – значение функции в интеграле Лапласа;

H_{max} – максимальная величина микронеровностей на поверхности иглы и корпуса распылителя;

h_0 – ход иглы, м;

k – коэффициент, характеризующий износостойкость материала, c^{-e} ($10^5 \dots 10^{12}$);

t^e – наработка при пластической деформации материала деталей;

σ – среднеквадратичное отклонение высоты микронеровностей, м;

F_H – номинальная площадь контакта, m^2 .

Величина микронеровностей на поверхности иглы и корпуса распылителя не превышает 0,3 мкм. Среднеквадратичное отклонение профиля микронеровностей составляет величину $\sigma=0,12$ мкм. [58].

Результаты расчёта отношения F_{ϕ} к F_H в зависимости от λ приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты расчёта вероятности значения

доверит. вероятн.	H_{max} , мкм	λ , мкм	σ , мкм	$(H_{max}-\lambda)/\sigma$	$\Phi_0(H_{max}-\lambda(t))/\sigma$	F_{ϕ}/F_H
0,5	0,3	0,5940349	0,12	2,0049709	0,4772	0,0228
		0,6883202		1,9263998	0,4664	0,0336
		0,7957415		1,8368821	0,4761	0,0349
		0,8463504		1,794708	0,4633	0,0367
		0,9745873		1,687844	0,4545	0,0455
		1,0346205		1,6378162	0,4484	0,0516
		1,0711188		1,607401	0,4463	0,0537
		1,0976406		1,5852995	0,4429	0,0571
		1,1185728		1,567856	0,4418	0,0582
		1,1359103		1,5534081	0,4394	0,0606
		1,1507341		1,5410549	0,4382	0,0618

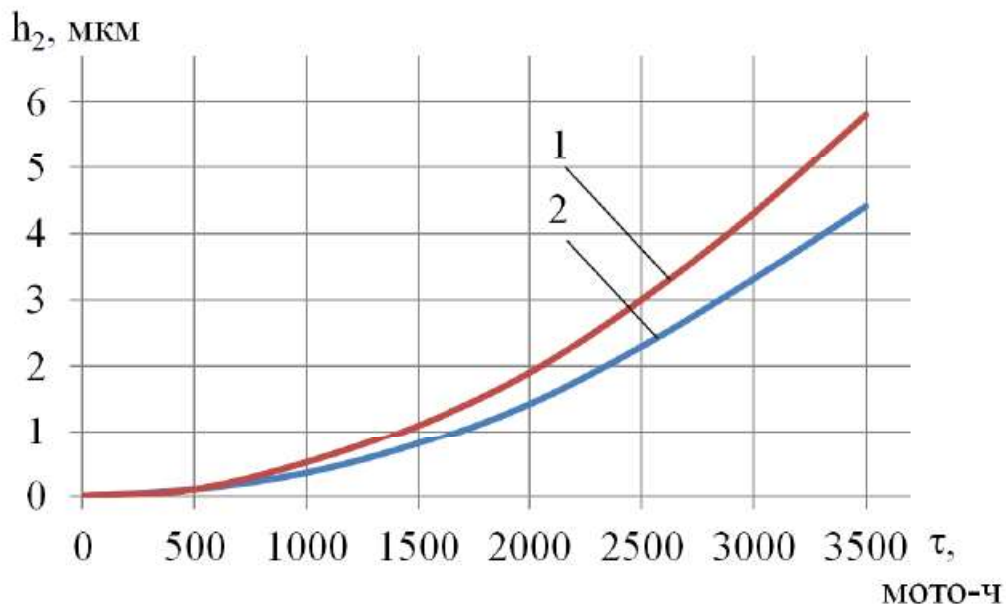
Таким образом, среднее значение фактической площади контакта:

$$F_{\phi} = \frac{0,0367 + 0,0455 + 0,0516 + 0,0537 + 0,0571 + 0,0582 + 0,0606 + 0,0618}{8} F_H \approx 0,053 F_H. \quad (2.43)$$

В качестве номинальной поверхности принимается боковая поверхность запорного конуса, определяемая по формуле (2.20).

Модуль объёмного сжатия топлива с присадкой $E \approx 500$ МПа.

Результаты расчетов h_2 по формуле (2.37) представлены на графике (Рис. 2.6):



1 - при работе на дизельном топливе ГОСТ 305;

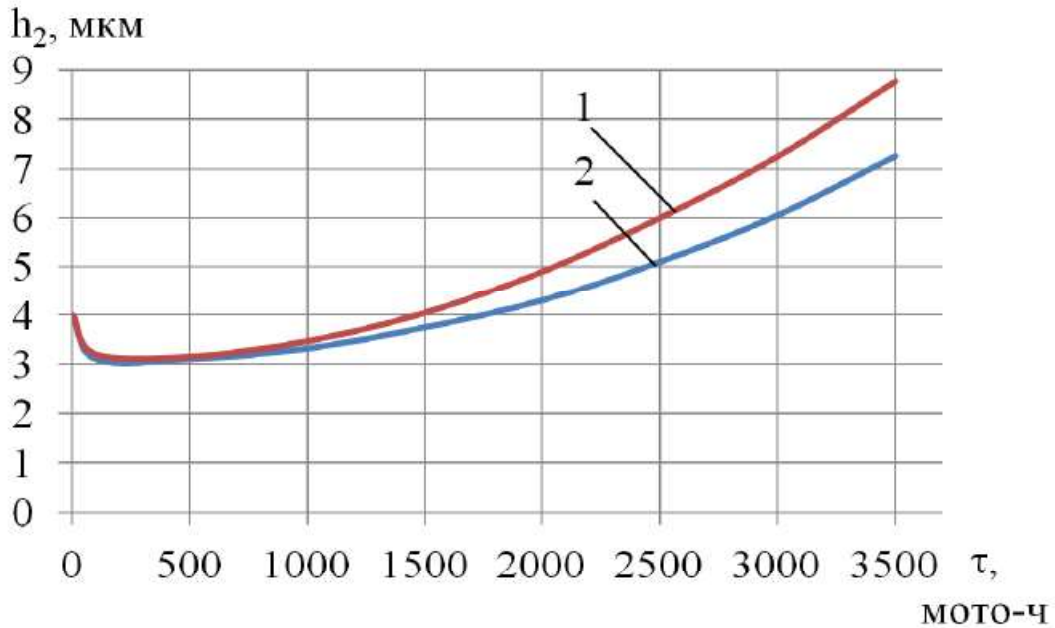
2 - при работе на дизельном топливе ГОСТ 305 с талловым и льняным маслом.

Рисунок 2.6 – Величина износа в сопряжении «игла – корпус распылителя» форсунки

Расчет, графическая интерпретация которого приведена на графике (Рис.2.6), показывает, что в начальный момент эксплуатации (0-500 мото-часов), зазор в сопряжении, в зависимости от величины накопленной энергии, увеличивается по кривой второго порядка – параболе, и изменяется в пределах 1 мкм. С увеличением наработки (500-3000 мото-часов), зазор в сопряжении возрастает до 6 мкм. При этой же наработки, в тех же условиях,

присадка на основе растительных масел способствует уменьшению зазора до 4 мкм.

Расчитанные по формуле (2.38) кривые, характеризующие суммарное изменение зазора в сопряжении в результате пластической деформации и накопления энергии в поверхностном слое деталей, представлены на графике (Рис.2.7):



1 – дизельное топливо ГОСТ 305;

2 – дизельное топливо ГОСТ 305 с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%.

Рисунок 2.7 – График суммарной величины износа сопряжения «игла-корпус распылителя» форсунки.

Анализ кривых (Рис. 2.7) показывает, что в результате деформации, при наработке до 100 мото-ч, зазор в сопряжении значительно снижается.

Использование дизельного топлива с присадкой ПТЛМ, в сравнении с товарным дизельным топливом, позволяет существенно изменить темп изнашивания, что в общей мере выражается в накоплении износа при наработке 1500 мото-ч.

2.4 Критерии работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок

Основным критерием работоспособного состояния распылителей форсунок является гидроплотность прецизионных пар распылителя.

Гидроплотность прецизионных пар распылителя зависит от величины зазора уплотняющей части сопряжения «игла - корпус распылителя» форсунки [50]. Таким образом, гидроплотность прецизионных пар можно определить исходя из зависимости Пуазейля:

$$T_c = \frac{12 \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot \nu_{cp} \cdot L \cdot V_{экв}}{\pi D g h^3} \ln \frac{P_1}{P_2}, \quad (2.44)$$

где D - номинальный диаметр иглы, м;

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

α - коэффициент сжимаемости испытываемого топлива, M^2/H ;

$\nu_{cp} = \frac{\nu_{P_1} + \nu_{P_2}}{2}$ - среднее значение кинематической вязкости топлива для

диапазона давлений p_1 и p_2 , M^2/c ;

L - длина уплотняющей части иглы, м;

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

h - значение радиального зазора в уплотняющем сопряжении в момент времени t , м;

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

Значение истинного коэффициента сжимаемости топлива в зависимости от рабочего давления p , определяется по эмпирической формуле:

$$\alpha \cdot 10^6 = \frac{40,4 - 0,01p}{\rho_0^{5,09 - 0,16\sqrt{p}}}, \quad (2.45)$$

где α - коэффициент сжимаемости испытываемого топлива, M^2/H ;

p - рабочее давления топлива в распылителе;

ρ_0 - плотность топлива при 20°C, г/см³.

С учётом (2.44) и (2.45) получена зависимость гидроплотности прецизионных пар распылителя:

$$T_c = \frac{A \cdot \alpha}{h(t)^{5,78} h(t)^{0,0441}}, \quad (2.46)$$

где α - коэффициент сжимаемости испытываемого топлива, м²/Н;

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

A - коэффициент, определяемый по формуле:

$$A = \frac{12 \cdot \gamma \cdot v_{cp} \cdot L \cdot V_{экв}}{\pi D g} \ln \frac{P_1}{P_2}. \quad (2.47)$$

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

$v_{cp} = \frac{v_{P_1} + v_{P_2}}{2}$ - среднее значение кинематической вязкости топлива для

диапазона давлений P_1 и P_2 , м²/с;

L - длина уплотняющей части иглы, м;

$V_{экв}$ - условный объём вытекающего из прибора топлива, м³;

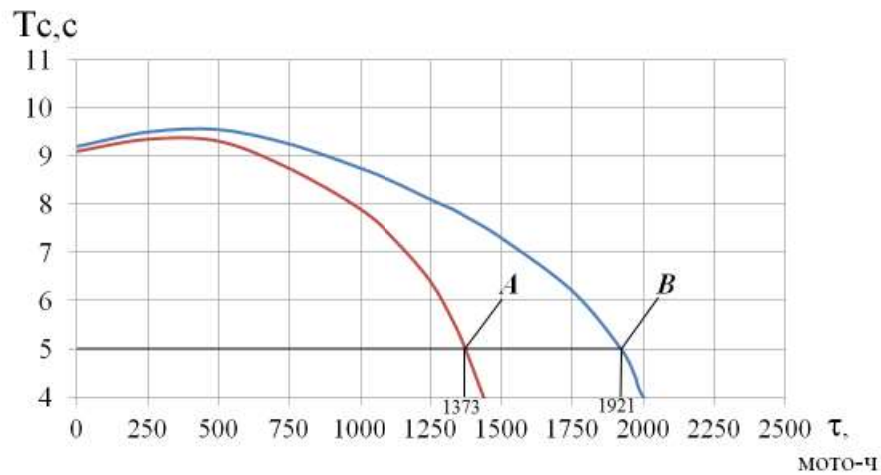
D - номинальный диаметр иглы, м;

g - ускорение иглы под действием силы тяжести, м/с²;

P_1, P_2 – абсолютное давление в начале и конце движения иглы во время запираания форсунки, МПа.

Формула (2.46) позволяет определить гидроплотность прецизионных пар распылителя в зависимости от интенсивности изнашивания и наработки распылителя форсунки.

Согласно результатам расчётов по формуле (2.46), гидроплотность, с учётом износа сопряжения $h(t)$, приведена на графике (Рис. 2.8):



τ - наработка сопряжений «игла - корпус распылителя» форсунок:

A – на дизельном топливе ГОСТ 305;

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

Рисунок 2.8 – Зависимость гидроплотности прецизионного сопряжения распылителя форсунки от наработки.

Анализ кривых, полученных по зависимости (2.46) показывают, что график зависимости может быть использован для прогнозирования $T\gamma_{80}$ ресурса сопряжения. Тогда, гидроплотность с учётом износа сопряжения гамма процентного ресурса $T\gamma_{80}$ (Рис. 2.9):

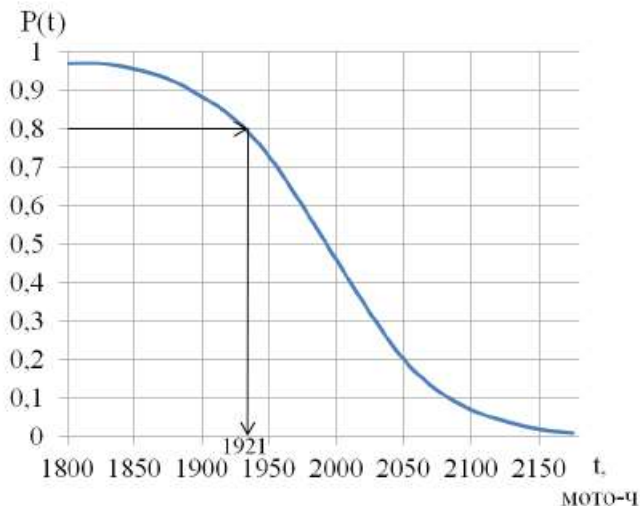


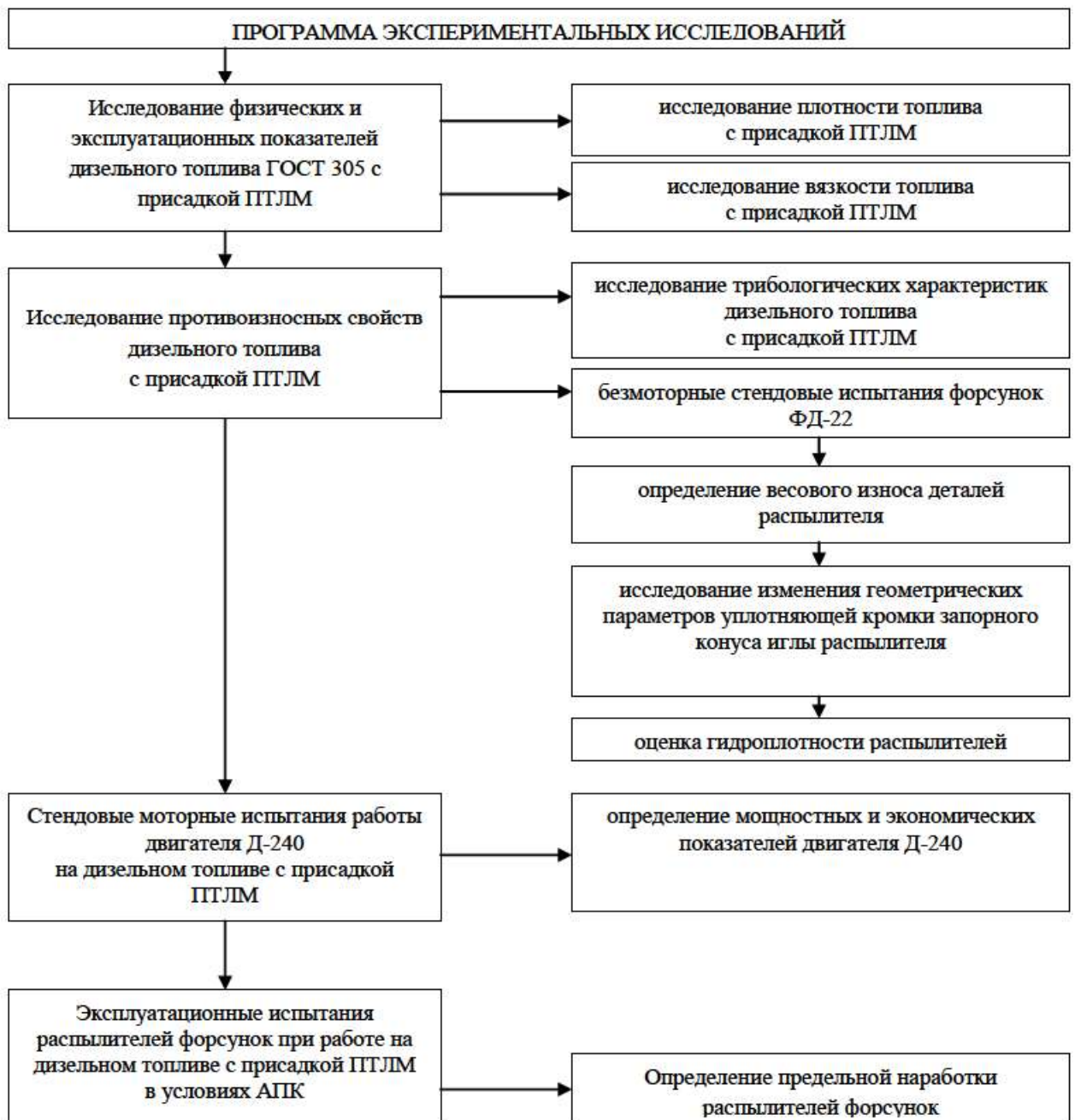
Рисунок 2.9 – Расчёт 80% ресурса сопряжения «игла - корпус распылителя» форсунки.

Таким образом, зависимость изменения гидроплотности прецизионных пар распылителя форсунки (формула (2.46)), можно использовать для прогнозирования ресурса сопряжения.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа исследований

Целью экспериментальных исследований является получение закономерностей изменения состояния прецизионных пар распылителей форсунок (на примере форсунки ФД-22), с применением присадки ПТЛМ (присадка на основе растительных масел с добавлением полиалкилбензола) в дизельном топливе ГОСТ 305. Программа исследований включает общие и частные методики исследований. Ниже приведена схема программы исследований.



3.2 Обоснование выбора марки топлива для проведения лабораторных исследований.

При исследовании использовали дизельное топливо летнее ДТ-Л ГОСТ 305 [38]. Выбор топлива основан на том, что это топливо используется на предприятиях АПК. Основные эксплуатационные показатели дизельного топлива указаны в таблице 3.1:

Таблица 3.1 – Основные эксплуатационные показатели дизельного топлива ГОСТ 305

Свойства	ДТ-Л ГОСТ 305
Плотность при 15 °С, кг/м ³	860
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с (сСт)	3,0 – 6,0

3.3 Методика лабораторных определений физических и эксплуатационных свойств дизельного топлива с присадкой ПТЛМ

Лабораторные исследования физических показателей дизельного топлива и дизельного топлива с присадкой ПТЛМ проводились по стандартным методикам, рекомендуемым соответствующими ГОСТ. Целью анализа является определение показателей, характеризующих их физические свойства:

- плотность топлива при 15 °С;
- вязкость кинематическая при 20 °С.

Исследование плотности топлива. Плотность дизельного топлива определяли по ГОСТ 3900 «Нефть и нефтепродукты» [42].

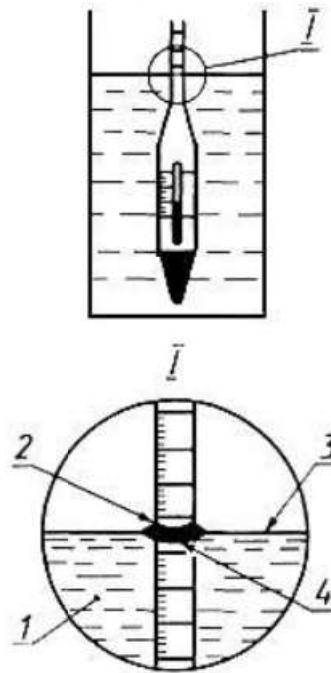
Согласно методике, измерение плотности проводится в цилиндре, заполненном топливом, при помощи ареометра (Рис. 3.5 см. п. 3.7).

Образец топлива, цилиндр, ареометр и термометр нагревают до требуемой температуры. Образец переносят в чистый цилиндр, находящийся в вертикальном положении, не проливая, и избегая образования воздушных пузырьков. Перед погружением ареометра в цилиндр с топливом, с

поверхности удаляют образовавшиеся пузырьки воздуха чистой фильтровальной бумагой.

В процессе измерения плотности следят, чтобы температура топлива поддерживалась постоянной, а температура окружающей среды не должна изменяться более чем на 2 °С.

Топливо непрерывно перемешивают термометром при полностью погружённом ртутном столбике. Стержень ареометра не должен намокать выше уровня погружения. При достижении стабильной температуры, ее записывают с точностью до 0,25 °С, а термометр удаляют и считывают показания шкалы ареометра ниже плоской поверхности жидкости (Рис. 3.1), и определяют точку на шкале ареометра, до которой поднимается образец.



1 - жидкость; 2 – точка съема показаний; 3 – горизонтальная поверхность жидкости; 4 – основание мениска.

Рисунок 3.1 – Показание шкалы для непрозрачных жидкостей

Сразу после считывания значения шкалы ареометра, снова осторожно перемешивают образец топлива термометром так, чтобы его ртутный столбик был полностью погружен в образец. Отмечают температуру образца с точностью до 0,2 °С, затем обрабатывают результаты.

Исследование вязкости топлива. Вязкость кинематическая при 20 °С определена по ГОСТ33 «Метод определения кинематической и расчет динамической вязкости» [41], а так же на автоматическом лабораторном аппарате марки D15KPLAUDA по стандартной методике ASTM D 2602, (Рис. 3.6 см. п. 3.7). Для определения вязкости использовали вискозиметры типа ВПЖ-2, ГОСТ 10028 для определения кинематической вязкости от 0,6 до 3000 сСт (мм²/с), Вискозиметр подобран так, чтобы время движения жидкости при проведении опыта было в пределах 200 – 600 с. Постоянная температура вискозиметра с точностью до 0,01°С поддерживали при помощи термостата ГЖ-ТС-01НМ.

3.4 Методика оценки противоизносных свойств моторного топлива

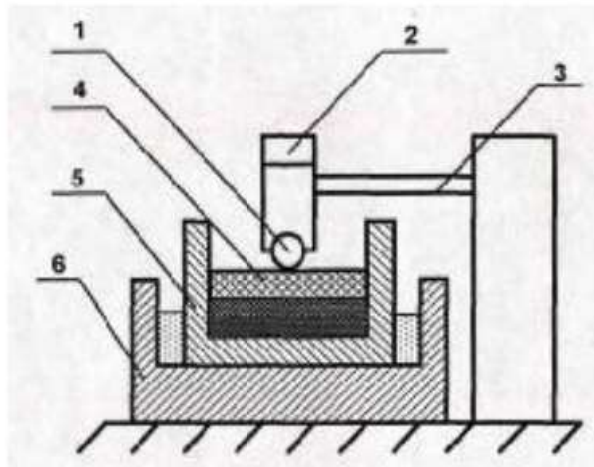
Программа исследований противоизносных свойств дизельного топлива с присадкой ПТЛМ включала:

- исследование трибологических характеристик дизельного топлива с присадкой ПТЛМ;
- безмоторные стендовые испытания для определения:
 - весового износа деталей распылителя;
 - изменения геометрических параметров уплотняющей кромки запорного конуса деталей распылителя;
- оценка гидроплотности распылителей (время падения давления от 19,6 до 17,6 МПа).

Исследование противоизносных свойств топлив проводили согласно ГОСТ ISO 12156-1-2012 - Топливо дизельное. Оценка трибологических характеристик дизельного топлива с присадкой ПТЛМ проведена определением смазывающей способности на аппарате HFRR.

В практике исследования противоизносных свойств более 10 различных методов. В международные стандарты на дизельное топливо вошел метод HFRR (high frequency reciprocating rig) и Vocle. Используется при исследовании противоизносных свойств топлива для оценки

смазывающей способности дизельных топлив на установке с высококачественным возвратно-поступательным движением (Рис.3.2).



- 1 – испытательный шарик; 2 – приложенная нагрузка; 3 – вибратор;
 4 – испытательная пластина; 5 – ёмкость для топлива;
 6 – нагревательная ёмкость.

Рисунок 3.2 – Принципиальная схема установки HFRR

Шарик 1 под действием приложенной нагрузки 200 ± 1 г, прижимается к испытательной пластине 4, и под воздействием вибратора 3 совершает возвратно-поступательное движение. Амплитуда колебаний шарика составляет $1 \pm 0,02$ мм; частота 50 ± 11 Гц; температура образцов топлива 60 ± 2 или 25 ± 2 мл. Образующееся на пластине пятно износа измеряли по двум диаметрам (вдоль и поперёк движения шарика) и вычисляли среднее значение, затем вносили поправку на температуру и влажность воздуха. Полученное среднее значение диаметра пятна износа является характеристикой смазочных свойств топлива [160].

Измерение пятна износа проводили цифровым микроскопом Celestron 40-600 (Рис. 3.7 см. п. 3.7) с увеличением 100х, снабжённый шкалой с ценой деления 0,01 мм.

3.5 Общая методика для проведения безмоторных стендовых испытаний форсунок ФД-22

Целью износных стендовых испытаний форсунки ФД – 22 является:

- определение весового износа деталей распылителя (иглы и корпуса);
- исследование геометрических параметров уплотняющей кромки сопряжения «игла - корпус распылителя» форсунки при концентрации присадки ПТЛМ 1-3% в дизельном топливе.

Проведение стендовых испытаний распылителей форсунок ФД-22 осуществлялось следующим образом:

Перед испытаниями на стенде КИ-921М были проведены контрольные испытания агрегатов топливной аппаратуры, которые включали проверку и регулировку топливного насоса УТН-5 с комплектами рабочих форсунок ФД-22, и топливопроводов высокого давления на соответствие требованиям испытаний.

Параметры топливного насоса проверяли согласно ГОСТ 10578 [45], параметры топливоподкачивающих насосов согласно ГОСТ 15829 [110].

Контрольные испытания и регулировку форсунок проводили на приборе КИ – 3333 (Рис. 3.12 см. п.3.7) согласно ГОСТ 10579 [121]. В соответствии с методикой испытания, форсунки были отрегулированы на давление впрыска 17,5 МПа.

Исследование динамики износа деталей распылителя форсунки ФД-22 проводили на топливном стенде КИ-921М (Рис. 3.8 см. п. 3.7), усовершенствованном в соответствии с методическими особенностями экспериментальных исследований. Стенд КИ-921М включает в себя бак для топлива, топливный насос высокого давления (ТНВД), соединительную арматуру и форсунки марки ФД – 22. Установленный на стенде насос приводился во вращение от электродвигателя с частотой вращения ротора 1250 мин^{-1} .

Определение весового износа деталей распылителей.

В процессе стендовых безмоторных испытаний на износ деталей распылителей форсунок ФД-22 контролировали изменение веса деталей прецизионных пар и изменение геометрических параметров уплотнительного пояса иглы распылителя [82].

Перед установкой форсунок, детали распылителя (иглу и корпус) взвешивали. Испытания проводили в течение 2500 мото-ч. Определение износа деталей распылителей форсунок проводили в трехкратной повторности, обеспечивающей доверительную вероятность $q = 0,8$ при относительной ошибке $\varepsilon = 0,1$ [47,48].

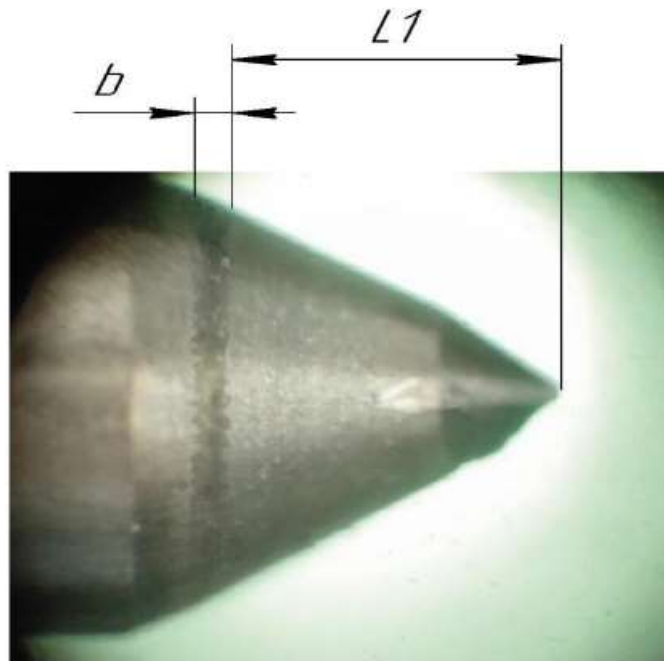
Измерение веса деталей проводили перед началом испытаний, и через 100, 500, 1000, 1500, 2000 и 2500 мото-часов.

Перед взвешиванием, детали распылителей форсунок (игла и корпус распылителя) промывались в бензине марки Б-70, и просушивались в сушильном шкафу при температуре 120 - 130°C.

Взвешивание деталей проводили на электронных лабораторных весах ВЛТЭ -150.

Исследование изменения геометрических параметров уплотняющей кромки сопряжения «игла-корпус распылителя» форсунки.

При исследовании параметров износа уплотняющей кромки запорного конуса иглы распылителя измеряли длину образующей L_1 (расстояние от конечной точки иглы до уплотняющей кромки), мм и ширину уплотнительного пояса b (Рис. 3.3) [61].



L_1 - расстояние от конечной точки иглы до уплотняющей кромки, мм;
 b - ширина уплотняющей кромки.

Рисунок 3.3 – Схема измерения параметров уплотняющей кромки

Измерение параметров уплотняющей кромки проводили на микроскопе БМИ-3 (Рис3.7 см. п.3.7). Точность измерения ± 3 мкм. Среднее квадратичное отклонение показаний микроскопа не более 1,5 мкм.

Для получения достоверных данных о техническом состоянии распылителей форсунок при исследовании, определялось минимально необходимое количество распылителей по формуле:

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 \cdot g^2}{\varepsilon^2}, \quad (3.1)$$

где t_{β} – нормированное отклонение, зависящее от доверительной вероятности α ;

g – коэффициент вариации;

ε – относительная ошибка.

При принятых в расчетах в соответствии с рекомендациями [25,35] значения доверительной вероятности $P = 0,8$, относительной ошибки $\varepsilon = 0,20$ и коэффициента вариации $v = 0,30$, минимально необходимое количество деталей N составило 28 шт. [152,154].

3.6 Методика оценки гидроплотности прецизионных пар распылителей форсунок

В ходе проведения безмоторных стендовых испытаний форсунок ФД-22 при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ проводилась оценка гидроплотности прецизионных пар распылителей с интервалом 250 мото-часов.

Гидроплотность распылителей является показателем, характеризующим техническое состояние прецизионных пар распылителя, который контролируется в процессе эксплуатации. Гидроплотностью распылителей является время снижения давления топлива в форсунке от 19,6 МПа до 17,6 МПа согласно ГОСТ 10579 «Форсунки дизелей. Общие технические условия» [50]. Оценка гидроплотности проводилась следующим образом:

1. Испытуемая форсунка устанавливается на стенд.
2. Топливная трубка ручного насоса наворачивается на штуцер форсунки.
3. Плавными нажимами рукоятки насоса удаляется воздух из трубопровода.
4. Затягивается гайка соединения трубопровода.
5. Пружина регулируется на давление впрыска топлива = 17,6 МПа (с точностью до 0,2-0,5).
6. Нажатием рукоятки насоса, стрелка манометра поднимается до момента впрыскивания топлива.
7. При достижении стрелки манометра показания 19,6 МПа, измеряется время снижения давления, в заданных пределах (19,6 – 17,6 МПа).
8. Измеренное время снижения давления в заданных пределах, сравнивается с аналогичным временем, полученным при испытаниях эталонного распылителя.
9. По результату сравнения оценивается гидроплотность распылителя.

10. Согласно нормативно – технической документации характеристик форсунок ФД-22, распылитель является не исправным, если время снижения давления составило менее 5 с.

Так же, гидроплотность оценивается величиной зазора h между иглой и седлом корпуса распылителя [68].

Для определения зазора в уплотняющем пояске между иглой и седлом использовался оптиметр ИКВ (Рис. 3.13 см. п.3.7). Увеличение составляло 1500 (150 – объектив и 10 – дополнительная линза). Оптиметр позволил измерять R_z до 0,8 мкм.

Размеры микронеровностей определяли по сетке с ценой деления 5 мкм. Снимки образцов микронеровностей совмещали между собой, и по поверхности деталей сопряжения определяли проходную площадь сечения: иглы 1 и седла 2 (Рис.3.4).



1 – игла распылителя форсунки; 2 – седло корпуса распылителя форсунки.

Рисунок 3.4 – Снимок образцов поверхностей иглы и седла корпуса распылителя форсунки для определения величины зазора h .

Микронеровности поверхностей иглы и седла исследовались отдельно, затем участки поверхностей одинаковой длины совмещали. При этом положении высчитывалась проходная площадь и сечение между зазорами микронеровностей. Среднюю величину зазора определяли по 10 точкам, равномерно распределённым на снимке.

3.7 Методика стендовых моторных испытаний

Целью стендовых моторных испытаний двигателя Д-240 является подтверждение работоспособности и исследование рабочего процесса двигателя при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%. Испытания проводили в ФГБУ «Сибирская государственная зональная машиноиспытательная станция» Таврического района Омской области на электротормозном стенде RAPIDO (Рис. 3.14 см. п 3.8), для испытания и обкатки двигателей внутреннего сгорания, оборудованном необходимыми измерительными приборами, устройствами и пультом управления. Все расчёты при обработке экспериментов выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 18509 [35]. При испытаниях снимались внешние регуляторные характеристики и сравнивались с паспортными.

Эффективная мощность двигателя (кВт):

$$N_e = \frac{0.001 \cdot P_t \cdot n_{cp}}{\eta_p \cdot 1,36}, \quad (3.2)$$

где P_t – показания весового механизма, кгс;

n_{cp} – средняя частота вращения вала двигателя, мин⁻¹;

η_p – К.П.Д. редуктора, (принимается 0,96 – 0,98).

Крутящий момент двигателя (Нм):

$$M_{\partial} = \frac{9550 \cdot N_e}{n_e}, \quad (3.3)$$

где N_e – мощность электродвигателя, кВт;

n_e – эффективная частота вращения вала электродвигателя мин⁻¹.

Кроме этого крутящий момент (кгс·м):

$$M_{\partial} = \frac{P_T \cdot L_T \cdot i_P}{\eta_P}, \quad (3.4)$$

где P_T – показания весового механизма, кгс;

L_T – длина плеча весового механизма электротормоза, мм ($L_T = 716,2$ мм);

i_p – передаточное число редуктора, (принимаем 1);

η_p – К.П.Д. редуктора, (принимаем 0,96 – 0,98).

Среднее эффективное давление (Н/см²):

$$Pe = \frac{900 \cdot N_e \cdot 9.81}{V_h \cdot n_{cp}}, \quad (3.5)$$

где N_e – мощность электродвигателя (кВт);

V_h – рабочий объём двигателя, л.;

n_{cp} – средняя частота вращения вала двигателя, мин⁻¹;

Часовой расход топлива (кг/ч):

$$G_m = \frac{3,6 \cdot \Delta G_T}{t_{on}}, \quad (3.6)$$

где ΔG_T – расход топлива за опыт, г;

t_{on} – время опыта, ч.

Удельный эффективный расход топлива (г/кВт·ч) определялся по формуле:

$$g_e = \frac{1000 \cdot G_T}{N_e}, \quad (3.7)$$

где G_T – расход топлива за опыт, г;

N_e – мощность электродвигателя (кВт).

Эффективный КПД определялся по формуле:

$$\eta_e = \frac{632,3 \cdot 1,36 \cdot N_e}{g_e \cdot H_U}, \quad (3.8)$$

где N_e – мощность двигателя, (кВт);

g_e – удельный расход топлива, г/кВт·ч.;

H_U – низшая теплотворная способность дизельного топлива, ккал/кг.

Достоверность экспериментальных исследований зависит от точности и надежности полученных результатов. Наличие случайных ошибок измерений делает необходимым проводить опыты с несколькими повторностями. Для определения количества повторностей опытов предварительно принимали величину относительной ошибки измерений,

взятую в долях среднего квадратического отклонения ($\Delta = 3$) и задавались надежностью полученного результата равной 0,95. По относительной ошибке измерений и принятой надежности, определяли количество повторностей измерений ($n = 3$) [25].

Проверка нулевой гипотезы, для выбраковки резко отклоняющихся значений данных, проводится вычислением доверительного интервала для всей совокупности и определением вероятности нахождения сомнительного значения x в пределах $\bar{x} \pm 3\sigma$, σ – среднее квадратическое отклонение, подсчитанное без учета сомнительного числа. Если x выходит за пределы $\bar{x} \pm 3\sigma$, то нулевая гипотеза отвергается на 5% уровне [47].

При обработке опытных данных определялись следующие показатели:

- среднее арифметическое параллельных опытов:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{r} \sum_{u=1}^r y_{iu} , \quad (3.9)$$

где r – количество параллельных опытов;

y_{iu} – значение функции отклика;

i – номер опыта;

u – повторность опыта.

Дисперсию параллельных опытов определяли по формуле Кохрена:

$$S_i^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{u=1}^r (y_{iu} - \bar{y}_i)^2 , \quad (3.10)$$

где r – количество повторностей;

i – номер опыта;

u – повторность опыта;

y_{iu} – значение функции отклика;

\bar{y}_i – среднее арифметическое параллельных опытов.

Для оценки однородности дисперсий параллельных опытов использовали критерий Кохрена, расчётное значение которого определяли по формуле:

$$G_p = \frac{S_{imax}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (3.11)$$

где S_{imax}^2 – максимальное значение дисперсии в опыте;

i – номер опыта;

N – число независимых опытов.

Полученное расчётное значение критерия Кохрена сравнивали с табличным значением для степеней свободы: числителя $f_1 = r - 1$; знаменателя $f_2 = N$; при выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$ [59].

В случае, если расчётное значение критерия Кохрена G_p не превосходило табличного значения G_T , гипотеза об однородности параллельных опытов принималась.

После проверки однородности параллельных опытов определяли дисперсию воспроизводимости по формуле:

$$S_{(y)}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2. \quad (3.12)$$

где S_{imax}^2 – максимальное значение дисперсии в опыте;

i – номер опыта;

N – число независимых опытов.

Среднеквадратичная ошибка эксперимента:

$$S(y) = +\sqrt{S^2(y)}. \quad (3.13)$$

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитывали по формулам для полного факторного эксперимента:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N x_0 \bar{y}_u}{N}, \quad (3.14)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_i \bar{y}_u}{N}. \quad (3.15)$$

где u – повторность опыта;

i – номер опыта;

N – число независимых опытов.

Проверку статистической значимости коэффициентов проводили с помощью t – критерий Стьюдента:

$$t_0 = \frac{|b_0|}{S(b_0)}, \quad (3.16)$$

$$t_i = \frac{|b_i|}{S(b_i)}. \quad (3.17)$$

Коэффициент уравнения регрессии считается статистически значимым при $t_p > t_{\text{табл}}$ для числа степеней свободы $N(r-1)$ и уровня значимости $\alpha = 0,05$.

После исключения статистически незначимых коэффициентов уравнения проверяли на адекватность по критерию Фишера:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S^2(y)}, \quad (3.18)$$

где $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности;

$S^2(y)$ – дисперсия воспроизводимости.

Дисперсию адекватности вычисляли по формуле:

$$S_{ад}^2 = \frac{r}{N - \lambda} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2, \quad (3.19)$$

где λ – число значимых коэффициентов модели;

r – число параллельных опытов;

u – повторность опыта;

N – число независимых опытов.

Если $F_m > F_p$, то гипотезу об адекватности модели принимали, для степеней свободы числителя $f_{ад} = N - \lambda$, $f_E = N(r - 1)$ и принятого уровня значимости $\alpha = 0,05$.

Уравнение приводили к натуральным значениям факторов при помощи формулы кодирования:

$$X_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\Delta x}, \quad (3.20)$$

где X_i – кодированное значение i -го фактора;

x_i – натуральное значение i -го фактора;

\bar{x} – нулевое значение фактора;

$\Delta x = \frac{x_{imax} - x_{imin}}{2}$ – полуразность максимального и минимального значений

фактора.

Моторные испытания проводились по методике ГОСТ 18509.

Были сняты мощностные и экономические показатели дизеля Д-240 при работе на дизельном топливе, и на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1 и 3%. По полученным результатам были построены внешние регуляторные характеристики в зависимости от мощности.

3.8 Методика планирования износных испытаний деталей распылителей форсунок

Для определения функциональной модели изнашивания деталей распылителя форсунки использован центрально-композиционный ортогональный план. Функциональную модель искали в виде:

$$\Delta Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2, \quad (3.21)$$

где ΔY - функция отклика, в нашем случае величина весового износа Δm , расстояние L_1 и ширина уплотняющего пояса 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:

$$X_{imax} = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (3.22)$$

где x_i - натуральное значение i -го фактора;

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

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

Опыты проводили в трёхкратной повторности [125]. Для исключения систематической ошибки проводили рандомизацию опытов.

Варьируемыми факторами являются наработка сопряжения τ и содержание присадки в топливе α . В таблице 3.1 приведены значения натуральных и кодированных значений факторов.

Таблица 3.2 - Уровни варьируемых факторов

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

При обработке опытных данных определяли следующие показатели [47,48]: Среднее арифметическое значение параллельных опытов:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3.23)$$

где x_i – отдельные результаты повторностей;

n – количество повторностей опыта.

Среднее квадратическое отклонение:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (3.24)$$

где x_i – отдельные результаты повторностей;

n – количество повторностей опыта.

Ошибка средней арифметической:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}. \quad (3.25)$$

где S – отклонение выборки;

n – количество повторностей опыта.

Доверительный интервал:

$$\Delta x = \pm t \cdot s_x, \quad (3.26)$$

где t – критерий Стьюдента;

S_x – отклонение выборки.

Критерий Стьюдента находили по таблице [39] в зависимости от надежности получаемых результатов и числа степеней свободы.

Увеличение числа опытов сопряжено со значительным увеличением трудоемкости экспериментов, в связи с этим к дополнительным опытам следует прибегать в случае, когда полученная по результатам минимального числа опытов модель не удовлетворяет требованиям адекватности.

Среднее значение наработки распылителей форсунок по параллельным опытам определяли по зависимости [129]:

$$y_i = \frac{1}{r} \sum_{u=1}^r y_{iu}, \quad (3.27)$$

где r – количество параллельных опытов;

y_{iu} – значение функции отклика;

i – номер опыта;

u – повторность опыта.

Дисперсию параллельных опытов определяли по формуле [39]:

$$S_i^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{u=1}^r (y_{iu} - \bar{y}_i)^2. \quad (3.28)$$

где r – количество параллельных опытов;

y_{iu} – значение функции отклика;

i – номер опыта;

u – повторность опыта.

Однородность дисперсий параллельных опытов определяли по критерию Кохрена [129]:

$$G_p = \frac{S_{i_{\max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (3.29)$$

где $S_{i_{\max}}^2$ - максимальное значение дисперсии в опыте;

$S^2(y)$ – дисперсия воспроизводимости опыта;

N – число независимых опытов;

i – номер опыта.

Расчетное значение критерия сравнивали с табличным для степеней свободы: $f_1=r-1$, знаменателя $f_2=N$ при выбранном уровне значимости $\alpha=0,05$ [129].

В случае если расчетное значение критерия Кохрена G_p не превосходит табличное значения G_T , гипотеза об однородности параллельных опытов принимается.

Дисперсию воспроизводимости рассчитывали по формуле [129]:

$$S_{(y)}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i^2, \quad (3.30)$$

где S_{i1}^2 - значение дисперсии в опыте;

N – число независимых опытов;

i – номер опыта.

Ошибка эксперимента рассчитывалась по формуле [129]

$$S(y) = +\sqrt{S^2(y)}. \quad (3.31)$$

где $S^2(y)$ – дисперсия воспроизводимости.

После определения коэффициентов уравнения проверяли на адекватность по критерию Фишера [129]:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{(y)}^2}, \quad (3.32)$$

где S_{ad}^2 - дисперсия адекватности;

$S_{(y)}^2$ - дисперсия воспроизводимости.

Дисперсию адекватности вычисляли по формуле [129]:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{N} \quad (3.33)$$

где \bar{y}_u – среднее значение коэффициента на определенном интервале наработки для параллельных испытаний;

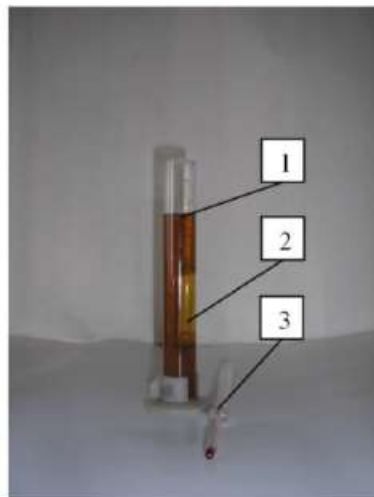
\hat{y}_u – значение коэффициента определенного по полученному уравнению регрессии на том же интервале наработки;

N – число интервалов наработки.

Если $F_p < F$ табл., то гипотезу об адекватности модели принимали для степеней свободы $f_{ad} = N - \lambda$, $f_E = N(r - 1)$ принятого уровня значимости $\alpha = 0,05$.

3.9 Оборудование для проведения лабораторных исследований

Оборудование для исследования плотности топлива по ГОСТ 3900 «Нефть и нефтепродукты» [42].



1 – цилиндр с анализируемым топливом; 2 – ареометр марки BS 718:1960; 3 – термометр.

Рисунок 3.5 – Цилиндр с ареометром для определения плотности анализируемых топлив.

Оборудование для исследования вязкости топлива по ГОСТ33 – 2016 «Метод определения кинематической и расчет динамической вязкости» [41].



Рисунок 3.6 – Автоматический лабораторный аппарат для определения вязкости топлива.

Оборудование для оценки противозносных свойств моторных топлив.

Цифровой микроскоп Celestron 40-600 (Рис. 3.7) с увеличением 1000х. Шкала с ценой деления 0,01мм.



Рисунок 3.7 – Цифровой микроскоп Celestron 40 – 600

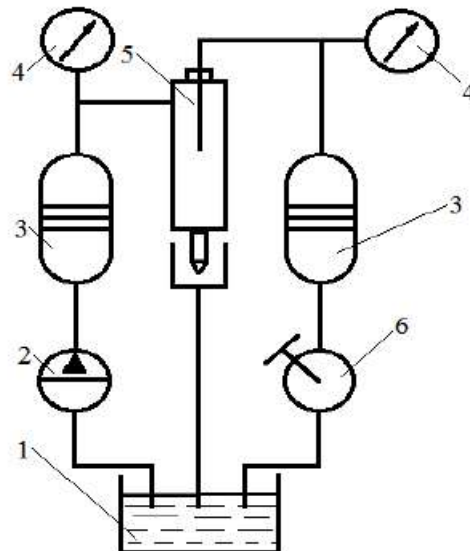
Оборудование для проведения безмоторных стендовых испытаний распылителей форсунок ФД-22:

Стенд КИ – 921М (Рис. 3.8) для проведения стендовых безмоторных испытаний форсунок ФД-22 на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ.



1 – корпус стенда; 2 – манометр; 3 – тахометр; 4 – форсунки; 5 – топливный насос высокого давления

Рисунок 3.8 – Стенд КИ - 921М



1 – топливный бак; 2 – топливный насос высокого давления ТНВД;
3 – гидроаккумулятор; 4 – манометр; 5 – форсунка; 6 – ручной подкачивающий насос.

Рисунок 3.9 – Принципиальная схема стенда КИ – 921М

Оборудование для определения весового износа деталей распылителей.

Весы электронные ВЛТЭ – 150 для исследования весового изнашивания деталей распылителя (Рис. 3.10). Точность измерения ± 3 мг. Среднее квадратичное отклонение показаний весов не более 1,5 мг.



Рисунок 3.10 – Весы ВЛТЭ – 150

Оборудование для исследования изменения геометрических параметров уплотняющей кромки сопряжения «игла - корпус распылителя» форсунки.

Микроскоп БМИ-3 для исследования изменения параметров уплотняющей кромки (Рис. 3.11).



Рисунок 3.11 – Микроскоп БМИ-3

Оборудование для оценки гидроплотности прецизионных пар распылителей.

1. Прибор КИ – 3333 (Рис. 3.12) для проведения контрольных испытаний и регулировки форсунок и для оценки гидроплотности в соответствии с ГОСТ 10579 [121].



Рисунок 3.12 – Прибор для испытания и регулировки форсунок КИ – 3333

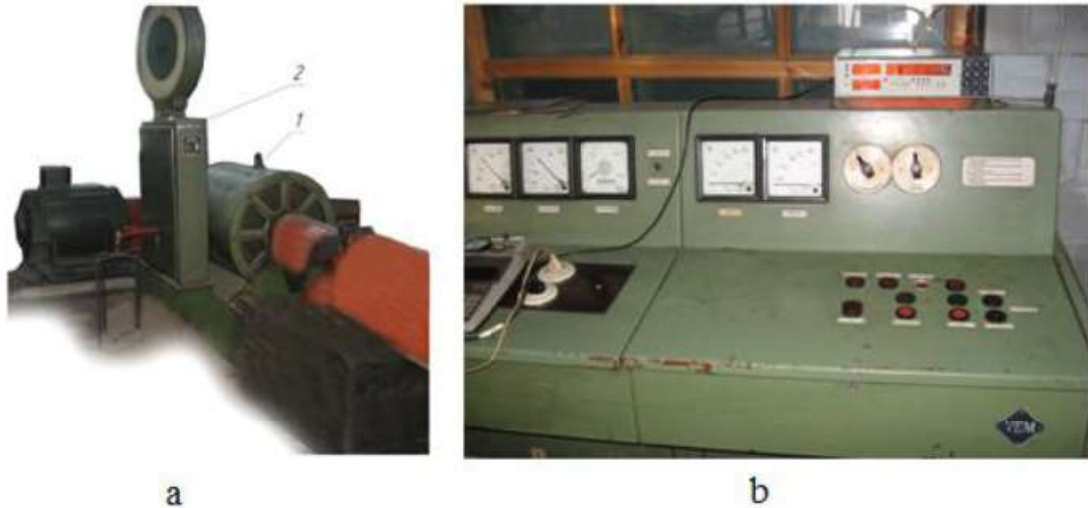
2. Оптиметр ИКВ для определения зазора в уплотняющем пояске в сопряжении «игла – корпус распылителя» форсунки (Рис. 3.13).



Рисунок 3.13 – Оптиметр ИКВ

Оборудование для проведения стендовых моторных испытаний двигателя Д-240 на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ.

1. Электротормозной стенд RAPIDO (Рис.3.14), оборудованный двигателем Д-240.



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

Рисунок 3.14 – Электротормозной стенд RAPIDO

2. Расходомер (датчик ГСП БА – 1005) для замера расхода топлива, проливаемого через форсунки, с электроавтоматическим отсчетом. Общий вид датчика ГСП БА – 1005 (Рис.3.15).



Рисунок 3.15 – Общий вид датчика ГСП БА – 1005

Частота вращения коленчатого вала дизеля измерялась дистанционным электротахометром электротормозного стенда с погрешностью $\pm 5 \text{ мин}^{-1}$.

Контроль температуры и давление окружающей среды осуществлялось ртутным термометром с ценой деления 0,5°С, и барометром МД-49-А с паспортной погрешностью измерения давлений не более 1 мм.рт.ст.

3.10 Методика проведения эксплуатационных испытаний распылителей форсунок при работе ДВС на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в условиях АПК

Для проведения эксплуатационных испытаний распылителей форсунок ФД-22 при работе ДВС на дизельном топливе ГОСТ 305 с присадкой ПТЛМ в концентрации 1% в условиях АПК выбраны предприятия Омской области, Таврического района: ООО «Полтава» и КФХ «Бабенко Лариса Фёдоровна». Эксплуатационные испытания проводились на тракторах марки МТЗ-80/82. Выбор предприятий осуществлялся исходя из требуемого количества тракторов одного года выпуска и выполняющих аналогичные производственные работы.

Минимально необходимое количество распылителей для получения достоверных данных о техническом состоянии распылителей форсунок определялось по формуле:

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 \cdot g^2}{\varepsilon^2}, \quad (3.34)$$

где t_{α} – нормированное отклонение, зависящее от доверительной вероятности α ;

g – коэффициент вариации;

ε – относительная ошибка.

Согласно (3.34) общее количество распылителей составило 28 шт.

В каждом из хозяйств один трактор работал на товарном дизельном топливе ГОСТ 305, три трактора работали на дизельном топливе ГОСТ 305 с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%. Трактора эксплуатировались в период с 2018 г по 2019 г. Нарботка каждого трактора за период эксплуатации в пределах 2500 мото-часов.

Для ТНВД были подобраны новые плунжерные пары одного завода-изготовителя. Перед установкой форсунок были выполнены предварительные испытания распылителей на гидроплотность. Каждый ТНВД отрегулирован на безмоторном стенде КИ-921М, по показателям дизеля Д-240 (44 11/12,5). Номинальная объемная цикловая подача топлива составляла $72,5 \pm 1 \text{ см}^3$ за 1000 циклов при частоте вращения кулачкового вала 1100 мин^{-1} , после чего были сняты скоростные характеристики ТНВД на товарном дизельном топливе.

Тракторы были оборудованы расходомерами «DFM 100B».

Присадку ПТЛМ готовили на территории нефтебазы АПК. Компоненты присадки (талловое и льняное масла, полиалкилбензол) заливали в ёмкость, на которую устанавливали насос для перекачки дизельного топлива. Готовое дизельное топливо с присадкой ПТЛМ заливали в 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-часов.

По результатам эксплуатационных испытаний устанавливали предельную наработку распылителей форсунок, и суммарный расход топлива каждого трактора.

3.11 Обоснование выбора компонентов присадки

Анализ проведенных исследований показал, что в чистом виде растительное масло в дизельном топливе не должно превышать 3%.

Выбор компонентов присадки ПТЛМ обусловлен следующими требованиями:

- повышение эксплуатационных качеств топлива;
- снижение нагарообразования на деталях распылителя;
- воспламеняемость;
- тепловыделение;

- экологическая безопасность.

Согласно этим требованиям были рассмотрены масла самых распространенных в России масличных культур рапса, подсолнуха и льна. Так же главным компонентом присадки является талловое масло, входящее в состав древесного сырья (хвойные породы; смесь хвойных и лиственных пород; лиственные породы), получаемое в качестве побочного продукта при варке целлюлозы сульфатным способом.

Анализ физических и эксплуатационных исследований дизельного топлива с присадкой ПТЛМ на основе растительных масел показал, что льняное и талловое масла имеют близкие значения плотности и вязкости к дизельному топливу.

Это позволило скорректировать данные параметры в топливе и при этом не повлиять на дисперсный состав образующихся капель при впрыске.

В результате проведенного анализа качеств компонентов присадки выбраны компоненты: талловое масло 55%, льняное масло 41%, и полиалкилбензол – вещество, являющееся сырьем для изготовления добавок к смазочным маслам - 4%.

Использование в дизельном топливе присадки ПТЛМ в концентрации 1-3% удовлетворяет требованиям Евро-6,

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты исследования физических и эксплуатационных свойств дизельного топлива

Экспериментальным исследованиям подвергалось дизельное топливо ГОСТ 305 и дизельное топливо с присадкой ПТЛМ (на основе таллового, льняного масел и полиалкилбензола) в концентрации 1, 2 и 3%. Методика исследования эксплуатационных свойств дизельного топлива с присадкой изложена в главе 3.

Результаты исследования плотности топлива.

Плотность ρ топлива оказывает влияние на смазывающие свойства топлива и на величину цикловой подачи. От плотности топлива зависит количество вводимого топлива в камеру сгорания, и, как следствие, получаемая в процессе сгорания энергия. При работе на топливе с низкой плотностью, наполнение цилиндра топливом затрудняется. При работе на топливах с высокой плотностью, снижается экономичность работы двигателя и увеличивается дымность отработавших газов. Показатель плотности нормируется в стандартах Российской Федерации ГОСТ 305 и стандартах многих зарубежных стран - ON C1191 (Австрия), DIN E 51606 (Германия), UNI 10635 (Италия), SS15 54 36 (Швеция) и др.

Для установления связи между плотностью минеральных масел и температурой, проведены исследования изменения физических свойств таллового и льняного масел от температуры. Также было исследовано влияние на физические свойства топлив с присадкой ПТЛМ, в состав которой входили минеральные масла в соотношениях дизельное топливо - минеральные масла 99:1; 98:2 и 97:3 (в процентном соотношении) соответственно.

С увеличением температуры значение плотности масел уменьшалась. Установлена закономерность изменения плотности при повышении температуры масла в виде:

$$\rho_{\text{тм}} = \rho_{\text{м}} - \kappa_{\rho\text{м}} \Delta t, \quad (4.1)$$

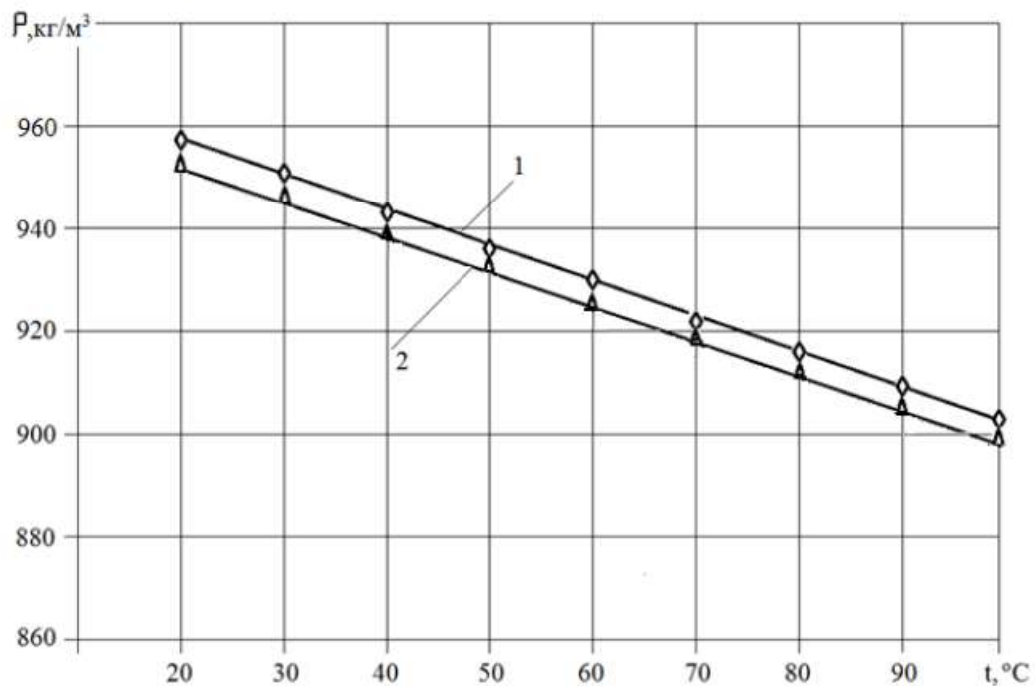
где $\rho_{\text{тм}}$ - плотность масла при температуре t °С, кг/м³;

$\rho_{\text{м}}$ - плотность масла при температуре 20 °С, кг/м³;

$\kappa_{\rho\text{м}}$ - температурный коэффициент изменения плотности, (для таллового масла $\kappa_{\rho\text{м}} = 0,531,1/^\circ\text{C}$; для льняного $\kappa_{\rho\text{м}} = 0,527, 1/^\circ\text{C}$).

$\Delta t = t - 20$ - перепад температур, °С.

Зависимость $\rho_{\text{тм}} = f(t)$ показана па рисунке 4.1.



1 - талловое масло; 2 - льняное масло; экспериментальные точки:

◊ - ◊ - ◊ - талловое масло; ▲ - ▲ - ▲ - льняное масло.

Рисунок 4.1 – Зависимость плотности растительных масел от температуры.

Анализ кривых показывает (Рис. 4.1), что талловое и льняное масла при температуре $t = 20$ °С имеют следующие значения плотности:

- плотность таллового масла $\rho_{\text{мт}} = 957$ кг/м³;

- плотность льняного $\rho_{\text{мт}} = 952$ кг/м³.

При добавлении в дизельное топливо ГОСТ 305 присадки ПТЛМ, в составе которого талловое и льняное масло в соотношении 55:45 соответственно, плотность дизельного топлива при 15°С составила:

- при концентрации ПТЛМ 1% - 866 кг/м³;
- при концентрации ПТЛМ 2% - 867 кг/м³;
- при концентрации ПТЛМ 3% - 868 кг/м³.

Результаты исследования вязкости топлива.

Вязкость топлива ν и сжимаемость топлива оказывает влияние на работу топливоподающей аппаратуры, на объемную цикловую подачу, определяет внутреннее трение топливного потока и гидравлические потери энергии в топливной системе. Однако, основным фактор влияния ν на цикловую подачу - утечка топлива через зазоры прецизионных деталей топливоподающей аппаратуры. От величины ν зависит, гидроплотность распылителя, степень дросселирования топлива в наполнительных и отсечных окнах втулки плунжера при их открытии и закрытии плунжером.

При номинальном режиме работы дизеля суммарные утечки топлива незначительны и составляли 0,3-0,5% от цикловой подачи при работе на дизельном топливе ГОСТ 305. Значения кинематической вязкости исследуемых образцов топлива с присадкой ПТЛМ:

- при концентрации ПТЛМ 1% - 4,30 мм²/с;
- при концентрации ПТЛМ 2% - 4,70 мм²/с;
- при концентрации ПТЛМ 3% - 5,0 мм²/с.

Проведенный анализ полученных значений показал, с увеличением концентрации присадки ПТЛМ в дизельном топливе, кинематическая вязкость описывается уравнением:

$$\nu_{\text{тк}} = \nu_{\text{т}} + K_{\nu} \cdot \alpha . \quad (4.2)$$

где $\nu_{\text{тк}}$ - кинематическая вязкость дизельного топлива с присадкой ПТЛМ, мм²/с;

K_{ν} - коэффициент изменения вязкости топлива в зависимости от содержания присадки ПТЛМ в дизельном топливе ($K_{\nu} = 0,209$);

α - процентное содержание присадки ПТЛМ в дизельном топливе, %.

Результаты экспериментальных исследований вязкости дизельного топлива с присадкой ПТЛМ представлены на рисунке 4.2.

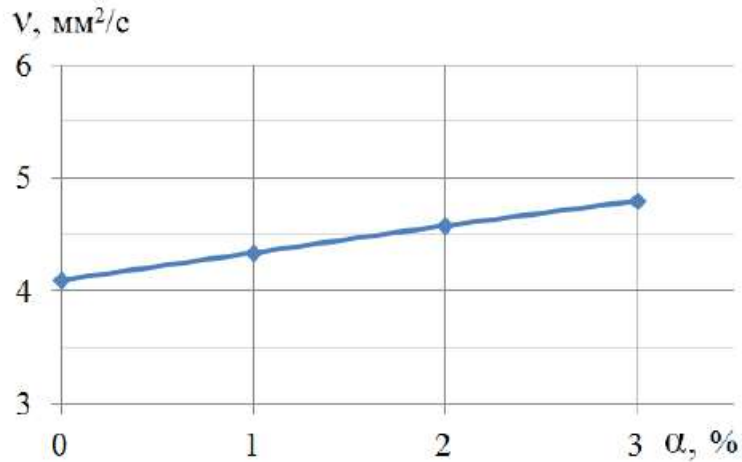


Рисунок 4.2 – Зависимость кинематической вязкости топлива от концентрации присадки ПТЛМ в дизельном топливе.

Изменение кинематической вязкости топлива при концентрации присадки ПТЛМ 1% - 3% описывается уравнением регрессии:

$$\nu_{\text{ДТ+ПТЛМ}} = \nu_{\text{ДТ}} + k_{\alpha} \cdot \alpha, \quad (4.3)$$

где k_{α} - коэффициент изменения вязкости дизельного топлива с присадкой ПТЛМ от концентрации присадки, $k_{\alpha} = 0,1931$;

$\nu_{\text{ДТ}}$ - вязкость дизельного топлива, мм²/с;

$\nu_{\text{ДТ+ПТЛМ}}$ - вязкость дизельного топлива с присадкой ПТЛМ, мм²/с.

4.2 Результаты исследования трибологических характеристик дизельного топлива с присадкой ПТЛМ

В таблице 4.2 представлены результаты исследования трибологических характеристик дизельного топлива ГОСТ 305 и дизельного топлива с присадкой ПТЛМ в концентрации 1 - 3% на автоматическом аппарате для определения смазывающей способности дизельного топлива по методу HFRR (High Frequency Reciprocating Rig - HFRR). Оценку смазывающей способности исследуемых образцов топлива проводили по диаметру пятна износа. По результатам проведенных исследований образцов топлива установлено, средний диаметр пятна износа:

- при дизельном топливе ГОСТ 305, диаметр пятна износа 534 мкм;
- при концентрации присадки ПТЛМ 1%, диаметр пятна износа - 440 мкм;

- при концентрации присадки ПТЛМ 3%, диаметр пятна износа – 452 мкм.

Наименьший средний диаметр пятна износа 440 мкм, при концентрации присадки ПТЛМ в дизельном топливе 1%.

Таблица 4.1 – Результаты определения пятна износа на машине HFRR

Образец	D _{из} , мкм			D _{ср} , мкм	S, мкм
	1	2	3		
ДТ	539	536	527	534	6,245
1	438	443	439	440	2,646
2	442	447	449	446	3,605
3	455	451	450	452	2,646
Сумма					15,142

Результаты экспериментальных исследований изменения диаметра пятна износа от концентрации присадки ПТЛМ описываются зависимостью:

$$D_{\text{изн}} = 25,25\alpha^2 - 100,05\alpha + 529,95 \quad (4.4)$$

где α – концентрация присадки ПТЛМ в дизельном топливе.

Для получения функциональной модели, отражающей зависимость диаметра пятна износа от концентрации присадки ПТЛМ в дизельном топливе (таблица 4.2), проверяли однородность параллельных опытов по критерию Кохрена.

Критерий Кохрена, вычисленный по формуле (3.11) равен 0,1083. Табличное значение при $\alpha = 5$, $f_1 = 2$ и $f_2 = 6$, равняется 0,7808. Рассчитанное значение критерий Кохрена не превосходит табличного, гипотеза об однородности опытов принимается.

На рисунке 4.3 представлена кривая, характеризующая изменение диаметра пятна износа, в зависимости от концентрации присадки ПТЛМ в дизельном топливе.

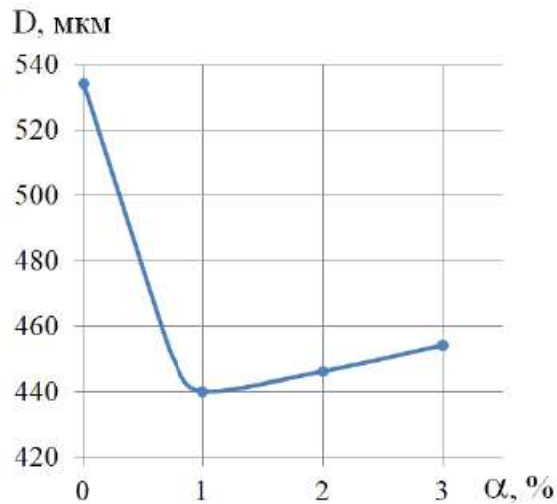


Рисунок 4.3 – Зависимость диаметра пятна износа на пластине от концентрации присадки ПТЛМ.

Анализ кривой показал (Рис. 4.3), при концентрации присадки ПТЛМ в топливе 1%, диаметр пятна износа наименьший (440 мкм). При увеличении концентрации присадки свыше 1% диаметр пятна износа возрастает на 2% и более.

Подобный эффект объясняется тем, что при концентрации присадки ПТЛМ в дизельном топливе 1%, на поверхности деталей образуется устойчивый слой смазки, который, при увеличении концентрации присадки, становится рыхлым, неустойчивым и некоторые участки поверхности деталей оголяются [92]. Полученные результаты исследования показывают, что при концентрации в дизельном топливе присадки ПТЛМ в диапазоне от 1 до 3% смазывающие свойства топлива удовлетворяют нормативным требованиям [37]. Для оценки концентрации присадки в топливе необходимо провести дополнительные исследования износостойкости деталей распылителя форсунки.

Результаты исследования физических, эксплуатационных и противоизносных свойств дизельного топлива с присадкой ПТЛМ в концентрации 1 - 3% представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Свойства дизельного топлива с присадкой ПТЛМ.

Свойства	ДТ	концентрация присадки ПТЛМ, %		
		1	2	3
Плотность при 15 °С, кг/м ³	860	865	867	868
Вязкость кинематическая, при 20 °С мм ² /с (сСт)	4,10	4,30	4,70	5,0
Диаметр пятна износа при 60 °С, мкм	534	440	446	452

Номер образца топлива соответствует концентрации присадки ПТЛМ в топливе.

4.3 Результаты проведения безмоторных стендовых испытаний форсунок ФД-22

Целью проведения испытаний распылителей форсунок при их работе на дизельном топливе ГОСТ 305 и на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ являлось определение износа деталей распылителя форсунки, и на основе проведенных испытаний, определение концентрации присадки ПТЛМ в топливе и предельной наработки распылителей форсунок.

Результаты определения весового износа деталей распылителей.

Весовой износ деталей распылителей определяли по потере веса иглы и корпуса распылителя [98].

Однородность параллельных опытов подтверждена критерием Кохрена. $G_{расч} = 0,2141 < G_{табл} = 0,2758$ при числе степеней свободы $f_1=2$ и $f_2 = 9$.

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

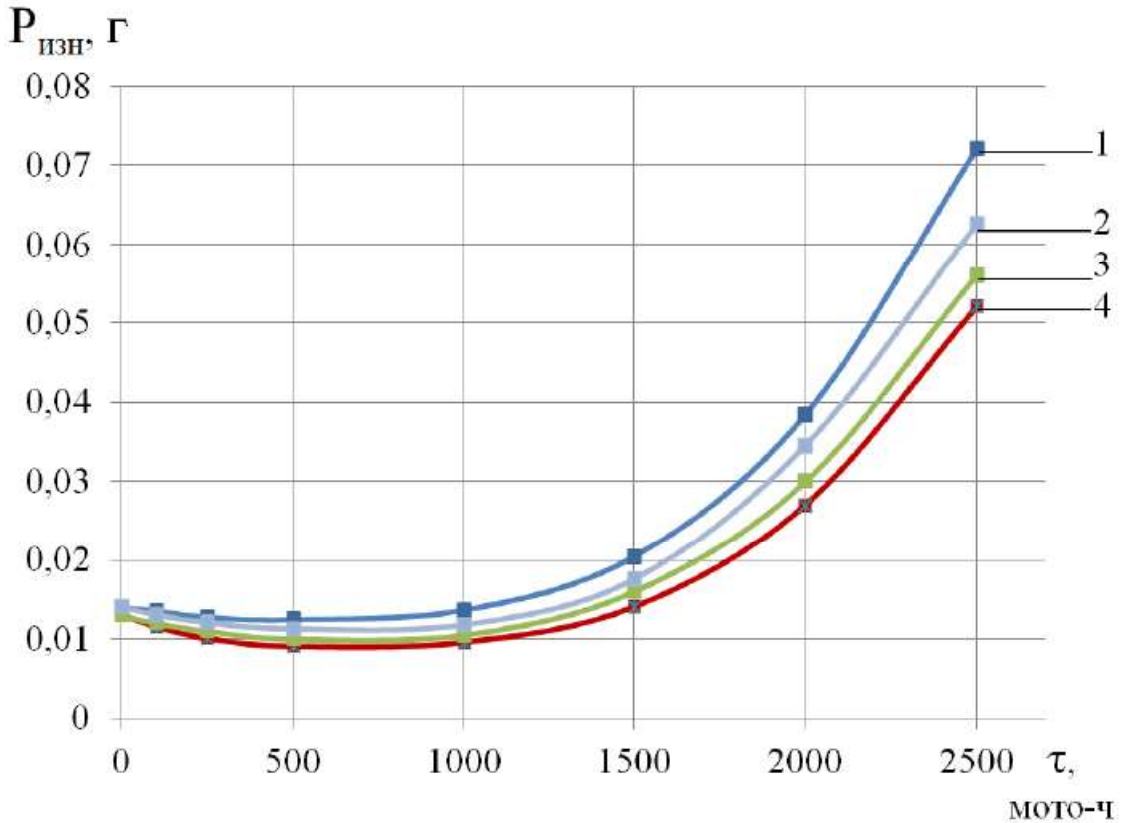
для износа иглы:

$$I_u = 2,66 \cdot 10^{-5} \alpha^2 - 5,22 \cdot 10^{-5} \alpha + 1,14 \cdot 10^{-4}. \quad R^2 = 0,914 \quad (4.5)$$

для износа корпуса:

$$I_x = 2,495 \cdot 10^{-5} \alpha^2 - 7,971 \cdot 10^{-5} \alpha + 2,93 \cdot 10^{-4}. \quad R^2 = 0,9794 \quad (4.6)$$

Результаты исследования весового износа иглы распылителей форсунок ФД-22 представлены на графике (Рис.4.4).



1 – дизельное топливо ГОСТ 305;

2 – дизельное топливо с присадкой ПТЛМ в концентрации 3%;

3 – дизельное топливо с присадкой ПТЛМ в концентрации 2%;

4 – дизельное топливо с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%.

Рисунок 4.4 – Средний весовой износ иглы распылителей форсунок ФД-22

При наработке форсунки 1500 мото-часов снижение веса иглы распылителя составляет:

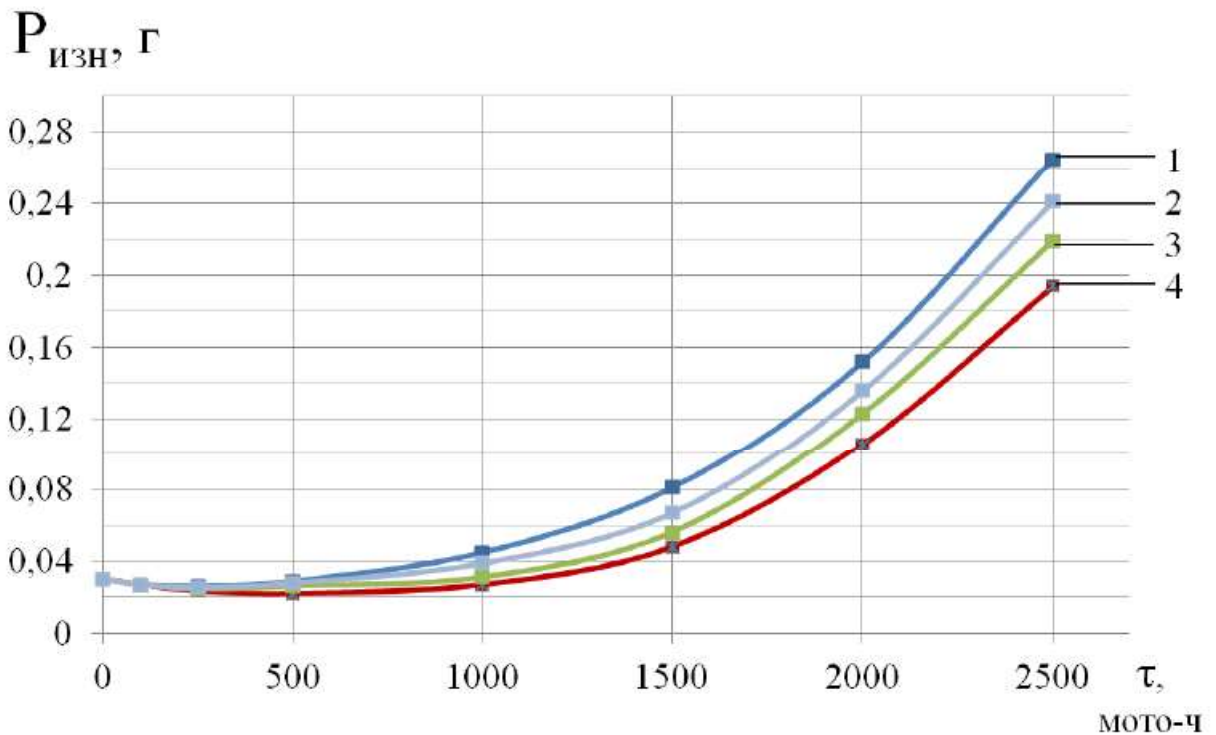
- при работе на товарном дизельном топливе - 0,021 г;
- при работе на дизельном топливе + 1% ПТЛМ - 0,014 г;
- при работе на дизельном топливе +2% ПТЛМ - 0,016 г;

- при работе на дизельном топливе +3% ПТЛМ - 0,018 г.

При наработке 2500 мото-часов, снижение веса иглы распылителя:

- при работе на товарном дизельном топливе - 0,072 г;
- при работе на дизельном топливе + 1% ПТЛМ - 0,052 г;
- при работе на дизельном топливе +2% ПТЛМ - 0,056 г;
- при работе на дизельном топливе +3% ПТЛМ - 0,063 г.

Результаты определения среднего весового износа корпуса распылителей форсунок ФД-22 представлены на графике (Рис. 4.5).



1 – дизельное топливо ГОСТ 305;

2 - дизельное топливо с присадкой ПТЛМ в концентрации 3%;

3 - дизельное топливо с присадкой ПТЛМ в концентрации 2%;

4 - дизельное топливо с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%.

Рисунок 4.5 – Средний весовой износ корпуса распылителей форсунок ФД-22

При наработке форсунки 1500 мото-часов, снижение веса корпуса составляет:

- при работе на товарном дизельном топливе - 0,081 г;
- при работе на дизельном топливе + 1% ПТЛМ - 0,048 г;

- при работе на дизельном топливе +2% ПТЛМ - 0,056 г;
- при работе на дизельном топливе +3% ПТЛМ - 0,067 г.

При наработке 2500 мото-часов, снижение веса корпуса составляет:

- при работе на товарном дизельном топливе - 0,265 г;
- при работе на дизельном топливе + 1% ПТЛМ - 0,194 г;
- при работе на дизельном топливе +2% ПТЛМ- 0,219 г;
- при работе на дизельном топливе +3% ПТЛМ - 0,241 г.

Таким образом, при работе форсунок ФД-22 на дизельном топливе ГОСТ 305, средний весовой износ составляет:

- для иглы - 0,063 г;
- для корпуса - 0,265 г.

При концентрации в дизельном топливе присадки ПТЛМ 1%, средний весовой износ деталей распылителя минимален, и составляет:

- для иглы – 0,052 г;
- для корпуса - 0,194 г.

Согласно представленным кривым (Рис.4.4; 4.5), изменение весового износа иглы и корпуса распылителей, при наработке 100 мото-часов, происходило независимо от концентрации присадки ПТЛМ в дизельном топливе. Это объясняется действием ударной нагрузки.

В диапазоне наработки 0 - 500 мото-часов интенсивность изнашивания сопряжений уменьшалась. Этот факт объясняется приработкой поверхности сопряжения деталей распылителей с образованием рабочей плоскости.

В диапазоне наработки 500 - 1000 мото-часов интенсивность изнашивания сопряжений увеличивалась от 0,02 до 0,04г. Режим нормальной работы прецизионных пар распылителей.

В диапазоне наработки 1500 - 2500 мото-часов наблюдается катастрофический износ поверхности деталей сопряжения от 0,05 до 0,06 г.

Таким образом, при концентрации присадки ПТЛМ в дизельном топливе 1%, уменьшение весового износа иглы и корпуса распылителей на

32%. При увеличении концентрации ПТЛМ в дизельном топливе свыше 1%, увеличение весового износа иглы и корпуса распылителей на 12% и более.

Следовательно, действие присадки ПТЛМ в дизельном топливе в концентрации 1 % ($\pm 0,5\%$) позволяет уменьшить изнашивание деталей распылителей форсунок.

Результаты исследований изменения геометрических параметров уплотняющей кромки сопряжения «игла - корпус распылителя» форсунок.

В таблице 4.5 приведены результаты измерения длины образующей L_1 от вершины конуса до уплотняющей кромки.

Таблица 4.3 - Результаты измерения длины образующей L_1 запирающего конуса, мм

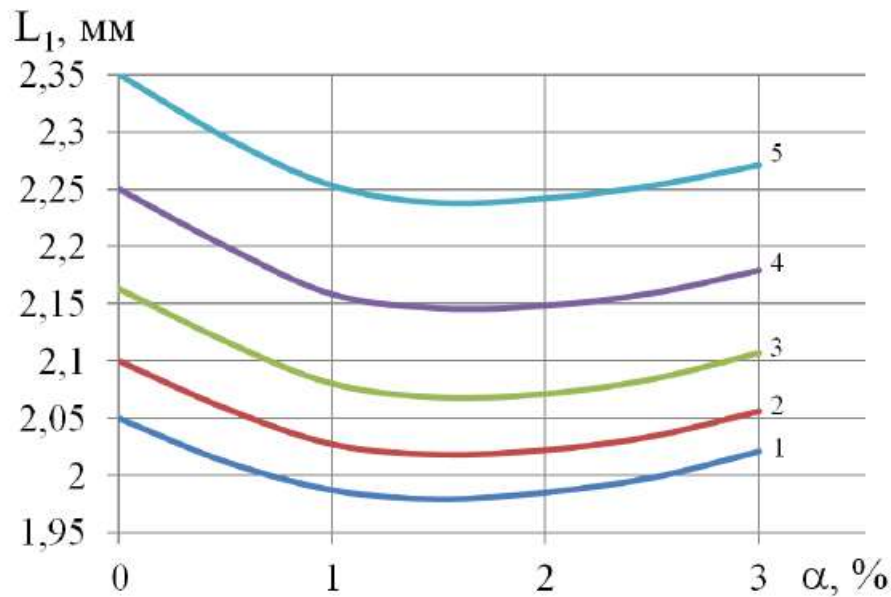
Наработка, мото-ч	ДТ	ДТ+ 1% ПТЛМ	ДТ+2% ПТЛМ	ДТ+3% ПТЛМ
0	2,028	2,027	2,029	2,031
100	2,035	2,027	2,029	2,032
500	2,054	2,039	2,045	2,052
1000	2,109	2,079	2,085	2,097
1500	2,184	2,132	2,141	2,157
2000	2,272	2,206	2,219	2,236
2500	2,395	2,297	2,314	2,341
Среднее	2,13875	2,10425	2,111375	2,029

На основании результатов в таблице 4.5, получена зависимость измерения длины образующей L_1 от наработки сопряжения t и концентрации присадки ПТЛМ в топливе:

$$L_1 = 5,028 - 3,07 \cdot 10^{-4} t - 0,07108\alpha - 8,7 \cdot 10^{-5} t \cdot \alpha + 3,94 \cdot 10^{-7} t^2 + 0,021508\alpha^2. \quad (4.7)$$

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

Расчитанные по формуле (4.7) кривые изменения расстояния L_1 , от концентрации присадки ПТЛМ в дизельном топливе α и наработки сопряжения t представлены на графике (Рис.4.6).



наработка τ , (мото-ч): 1 – 500; 2 – 1000; 3 – 1500; 4 – 2000; 5 – 2500.

Рисунок 4.6 – Зависимость изменения длины образующей L_1 от вершины конуса до уплотняющей кромки, от концентрации α присадки ПТЛМ и наработки сопряжения τ :

Из приведенных графиков (Рис.4.6) установлено увеличение длины образующей L_1 от вершины конуса до уплотняющей кромки с увеличением наработки. Это связано с деформацией кромки при ударах иглы по корпусу распылителя. Наибольшее увеличение L_1 при работе на товарном дизельном топливе. Так при наработке 1500 мото-часов увеличение длины образующей L_1 составило 0,156 мм. Таким образом, увеличение длины образующей L_1 от вершины конуса до уплотняющей кромки составило:

- при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1% - 0,105мм;
- при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 2% - 0,11 мм;
- при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 3% - 0,128мм.

В среднем значение длины образующей от вершины конуса до уплотняющей кромки составило:

- при работе на дизельном топливе - 0,111мм;
- при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1% - 0,077мм;
- при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 2% - 0,08мм;
- при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 3% - 0,093мм.

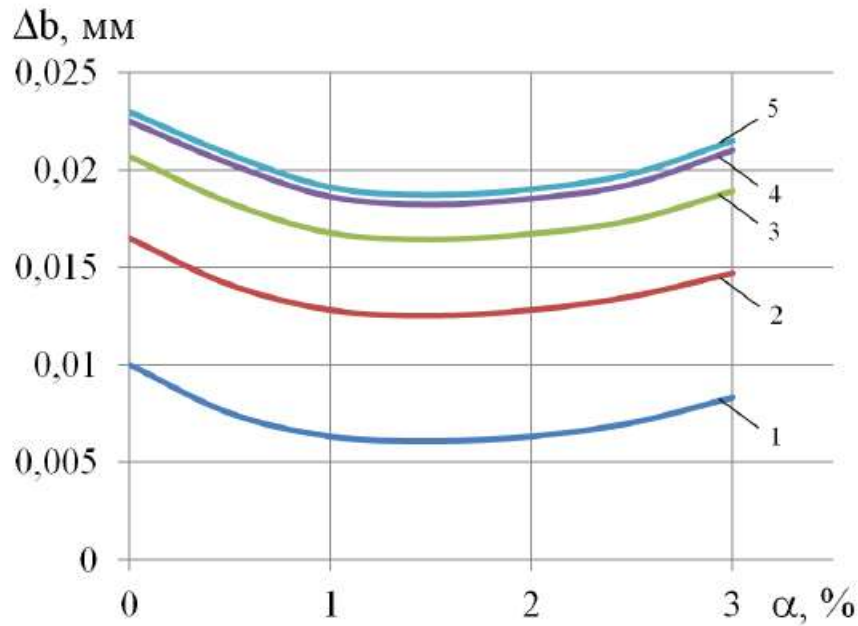
Измерения длины образующей от вершины конуса до уплотняющей кромки показали, что при работе распылителей на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1,2 - 1,5%, смещение уплотнительного пояса от исходного положения меньше на 30%, чем при работе на дизельном топливе ГОСТ 305.

При обработке результатов изменения ширины уплотняющей кромки в зависимости от наработки t и концентрации присадки ПТЛМ α получена зависимость:

$$\Delta b = 0,0011746\alpha^2 - 2,97 \cdot 10^{-2}\alpha - 6,8 \cdot 10^{-3} + 2,01 \cdot 10^{-4}t - 4,6 \cdot 10^{-8}t^2. \quad (4.8)$$

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

Графическая интерпретация зависимости (4.8) представлена графике (Рис. 4.7).



наработка τ , (мото-ч): 1 – 500; 2 – 1000; 3 – 1500; 4 – 2000; 5 – 2500.

Рисунок 4.7 – График зависимости ширины уплотняющей кромки от концентрации α присадки ПТЛМ в дизельном топливе

Представленные на графике кривые (Рис.4.7) показали, что

- при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1% ширина кромки уменьшилась на 22%.
- при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1% - 1,25% ПТЛМ ширина кромки увеличилась на 12%.
- при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1,25% - 3%, ширина кромки увеличилась на 43%.

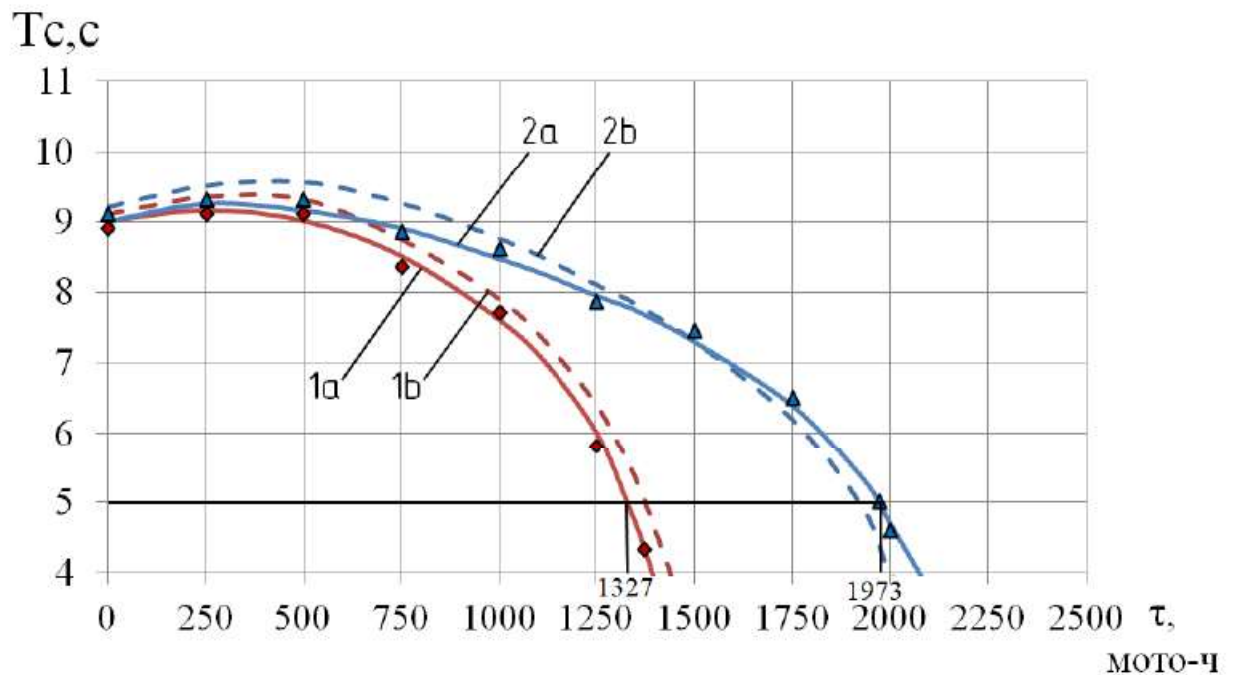
По результатам проведенных исследований установлено, что наименьшее изменение ширины уплотняющей кромки происходит при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ от 1% до 1,25% .

Результаты исследований подтвердили предположение об образовании на поверхностях деталей рыхлого, неустойчивого поверхностного слоя, разрушающегося в процессе работы распылителя форсунки, при концентрации присадки ПТЛМ в дизельном топливе менее 1% и более 1,25% .

4.4 Результаты оценки гидроплотности прецизионных пар распылителей форсунок

Оценка гидроплотности (время падения давления с 19,6 до 17,6 МПа не менее 5-7с) прецизионных пар распылителей форсунок проводилась согласно нормативно-технической документации к форсункам с гидравлически управляемым запорным клапаном [50].

По результатам определения гидроплотности прецизионных пар распылителей построены кривые (Рис. 4.8).



1 – средний ресурс распылителей на дизельном топливе (ГОСТ 305):

а – экспериментальный; б – теоретический.

2 – средний ресурс распылителей на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%:

а – экспериментальный; б – теоретический.

Рисунок 4.8 – Результаты изменения гидроплотности распылителей при безмоторных стендовых испытаниях форсунок ФД-22

В начальный период испытаний гидроплотность распылителей форсунок возрастала с 8,9 с до 9,4 с (Рис. 4.8). В этот период происходило уменьшение зазора в уплотняющем сопряжении в результате пластической деформации микронеровностей на поверхности деталей. При дальнейшей

работе гидроплотность снижалась монотонно, что является результатом износа прецизионных сопряжений приработанных деталей. При этом, уменьшение гидроплотности распылителей на товарном дизельном топливе происходит более интенсивно, чем на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ.

При наработке форсунки на дизельном топливе 750 мото-ч, гидроплотность составила 8,4 с. При наработке форсунки на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%, гидроплотность составила 8,9 с.

Увеличение гидроплотности при работе форсунок на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ объясняется как снижением изнашивания прецизионных сопряжений распылителя форсунки, так и увеличением вязкости топлива при добавлении присадки ПТЛМ.

В качестве предельного ресурса взята выборка распылителя форсунки, при которой гидроплотность (снижение давления от 19,6 до 17,6 МПа менее 5 с). Таким образом, из анализа графиков (Рис. 4.8) установлено, что, при использовании дизельного топлива с присадкой ПТЛМ в концентрации 1% зафиксировано увеличение наработки распылителей:

- при работе на дизельном топливе, наработка распылителя форсунки составила 1327 мото-ч;

- при работе распылителей на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%, наработка распылителей составила 1973 мото-ч.

Нарботка распылителей, работающих на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%, превысила 646 мото-часов работы распылителей на дизельном топливе ГОСТ 305.

Таким образом, при учёте влияния концентрации присадки ПТЛМ в дизельном топливе на изнашивание прецизионных сопряжений «игла-корпус распылителя» форсунок, следует вывод:

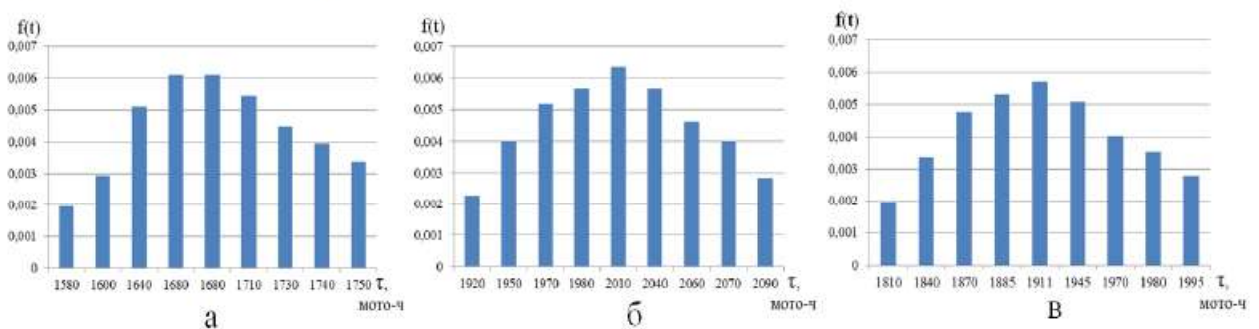
- рациональная концентрация присадки ПТЛМ в дизельном топливе составляет 1%.

Результатам статистических наблюдений значений ресурса распылителей форсунок представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Ресурс распылителей форсунок ФД-22

Топливо	Ресурс распылителей, (наработка τ) мото-ч							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ДТ	1560	1580	1610	1660	1740	1760	1786	1500
ДТ+1% ПТЛМ	1920	1950	1970	1980	2040	2060	2070	2090
ДТ+3% ПТЛМ	1810	1840	1870	1885	1945	1970	1980	1995

Для оценки распределения ресурса распылителей форсунок по результатам таблицы были построены гистограммы распределения, представленные на рисунке 4.9.



а – дизельное топливо ГОСТ 305;

б – дизельное топливо с концентрацией ПТЛМ 1%;

в – дизельное топливо с концентрацией ПТЛМ 3%.

Рисунок 4.9 – Гистограммы распределения ресурса распылителей

Анализ гистограмм показывает, что распределение ресурсов распылителей можно описать нормальным законом распределения.

Для подтверждения закона распределения использован коэффициент вариации, определяемый по формуле:

$$K_v = \frac{\sigma}{t - t_m}, \quad (4.9)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение ресурса распылителей, мото-ч;

t – ресурс распылителей (наработка, мото-ч);

t_m – время, после которого исследовались распылители на отказ, ч. ($t_m = 1450$ мото-ч). При значении коэффициента меньше 0,3, принимался нормальный закон распределения.

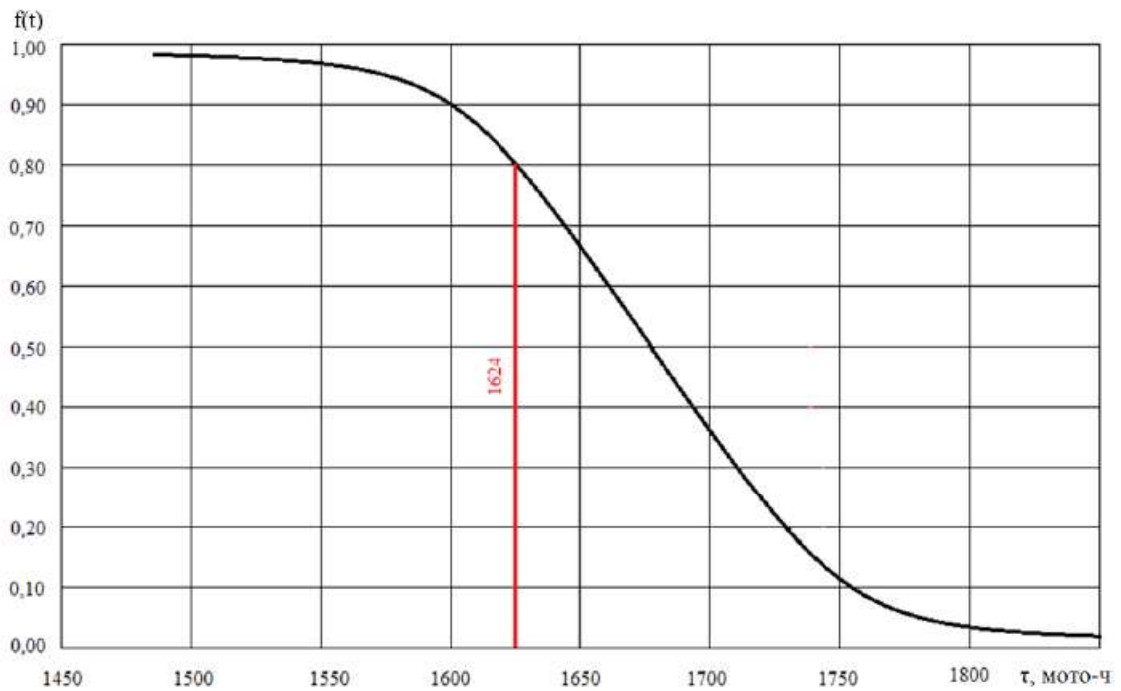


Рисунок 4.10 – 80% процентный ресурс распылителей при работе на дизельном топливе ГОСТ 305.

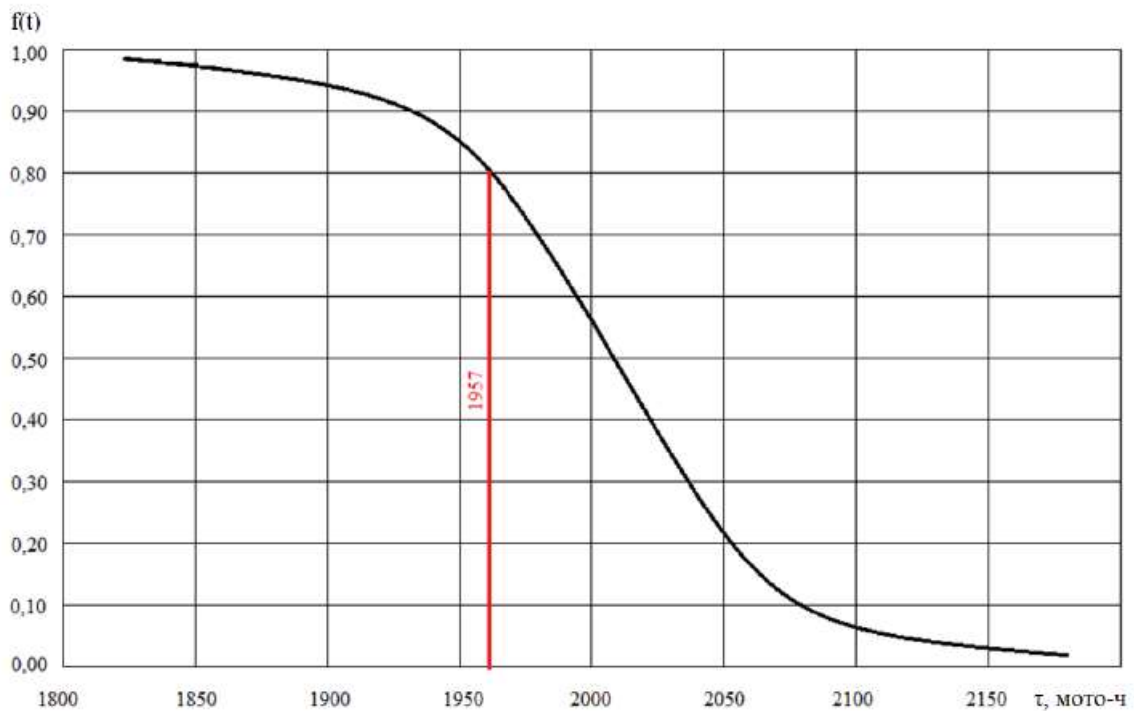


Рисунок 4.11 – 80% процентный ресурс распылителей при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%.

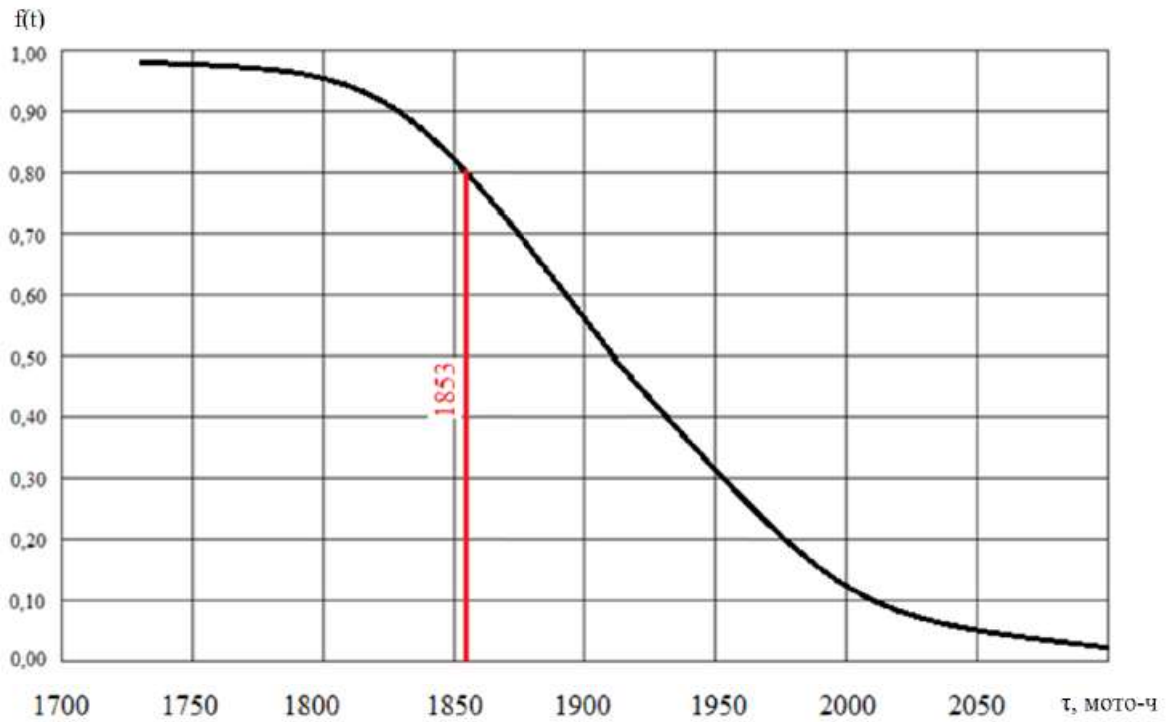


Рисунок 4.12 – 80% процентный ресурс распылителей при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 3%.

Анализ приведенных на рисунках 2 – 4 кривых, характеризующих 80 процентный ресурс распылителей форсунок, показал:

- распылители форсунок, работавшие на дизельном топливе ГОСТ 305, имели наименьший ресурс (1624 мото-часов);
- распылители форсунок, работавшие на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 3%, имели промежуточный ресурс (1853 мото-часов);
- распылители форсунок, работавшие на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%, имели наибольший ресурс (1957 мото-часов).

Проведенные расчеты гамма-процентного ресурса подтвердили ранее полученные выводы о результатах исследований работы прецизионного сопряжения распылителей при использовании дизельного топлива с присадкой ПТЛМ.

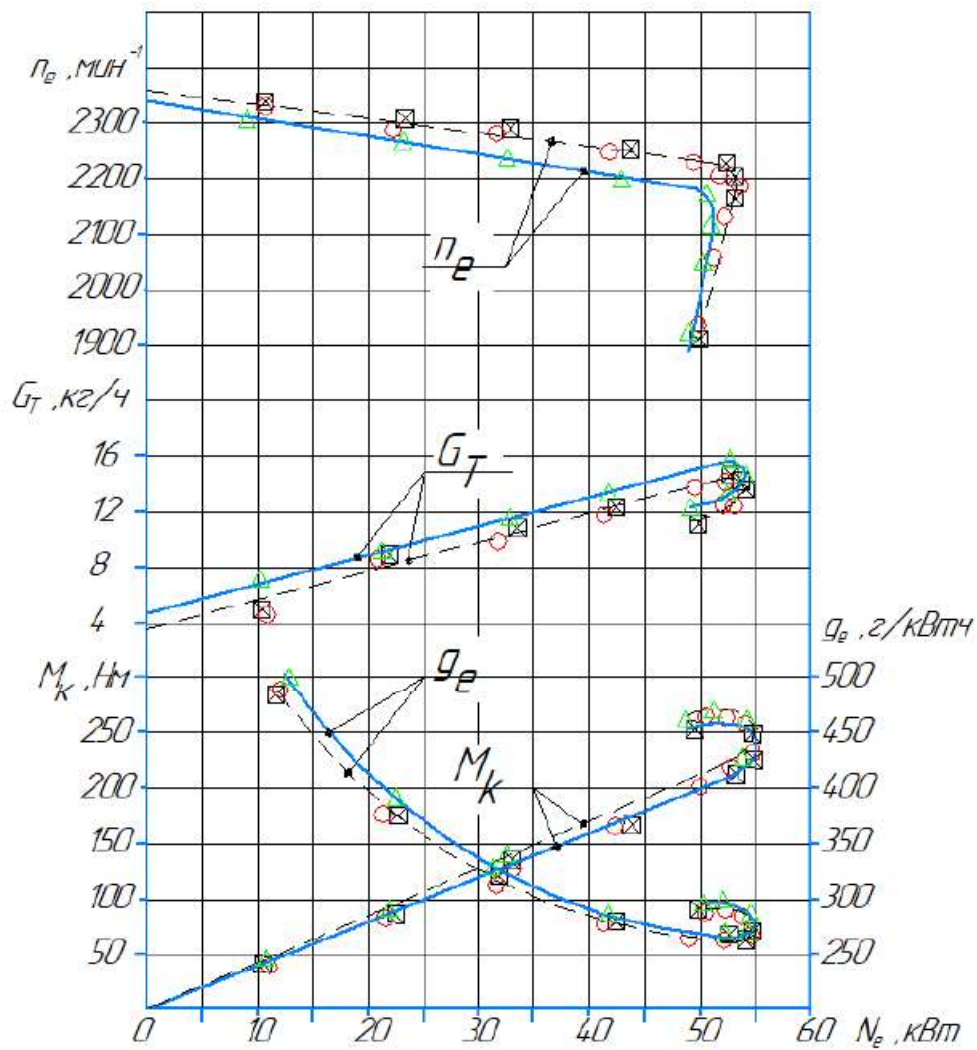
4.5 Результаты стендовых моторных испытаний

Дизельное топливо с присадкой должно удовлетворять эксплуатационным требованиям, при использовании его без доработки системы топливоподачи, при этом ДВС должен иметь эксплуатационные характеристики не ниже паспортных. Эксплуатационные исследования при работе на дизельном топливе ГОСТ 305 и дизельном топливе с присадкой в концентрации 1% и 3% проводились с целью определения возможности эксплуатации техники на дизельном топливе с присадкой, и оценки мощностных показателей ДВС. По результатам испытаний снята внешняя регуляторная характеристика дизельного двигателя Д-240 (Рис.4.13). Методика проведения испытаний изложена в главе 3.

Полученные результаты показали, что при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 3% происходит снижение эффективной мощности двигателя на 1,3% и увеличение удельного эффективного расхода топлива на 3,6%.

При снижении концентрации присадки ПТЛМ в топливе до 1%, параметры работы ДВС равны тем, что развивает двигатель при работе на товарном дизельном топливе ГОСТ 305. При переводе дизельного двигателя Д-240 на работу с дизельным топливом с присадкой ПТЛМ никакие регулировки не требуются. Из этого следует вывод о возможности эксплуатации техники на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ, в состав которого входят талловое и льняное масла и полиалкилбензол.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации при работе дизельных ДВС на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%.



○ — ○ — ○ — дизельное топливо ГОСТ 305;

⊠ — ⊠ — ⊠ — дизельное топливо с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%;

△ — △ — △ — дизельное топливо с присадкой ПТЛМ в концентрации 3%.

Рисунок 4.13 – Внешняя регуляторная характеристика дизельного двигателя Д-240.

4.6 Результаты эксплуатационных испытаний распылителей форсунок при работе ДВС на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в условиях АПК

Эксплуатационные испытания ДВС, оснащенных форсунками ФД-22, при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1% в условиях АПК проведены на предприятиях ООО «ПОЛТАВА» и КФХ «Бабенко Лариса Фёдоровна» Таврического района Омской области на семи

тракторах марки МТЗ-80/82. Общее число форсунок составляло 28 шт., что необходимо и достаточно, согласно программе испытаний.

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

Для сравнительной оценки наработки распылителей, работающих на товарном дизельном топливе и на топливе с присадкой ПТЛМ, тракторы были разделены на две группы:

- эталонная группа (3 трактора) эксплуатация на дизельном топливе ГОСТ 305;

- экспериментальная группа (4 трактора) эксплуатация на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%.

Обе группы тракторов выполняли одинаковые полевые работы. Их производственная нагрузка и условия эксплуатации усреднялись, как и наработка.

Тракторы эксплуатировались в период с 2018 по 2019 г. Замер расхода топлива проводили при помощи датчика расхода дизельного топлива: «Расходомер DFM 100B». Наработка каждого трактора за период эксплуатации в пределах 2000 мото-часов. Результаты эксплуатационных испытаний приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.5 – Расход топлива при эксплуатационных испытаниях форсунок ФД-22 на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ

Наработка распылителей τ, мото-ч	0	250	500	750	1000	1250	1421	1500	1750	1902
Расход ДТ, (кг/ч)	14,1	14,2	14,3	14,7	15,2	15,9	16,5	---	---	---
Расход ДТ+1%ПТЛМ, (кг/ч)	14	14	14,1	14,1	14,3	14,7	15	15,2	15,9	16,5
Средний расход ДТ, (кг/ч)	---	14,1	14,2	14,5	14,9	15,5	16,2	---	---	---
Средний расход ДТ+1%ПТЛМ, (кг/ч)	---	14	14	14,1	14,3	14,5	14,8	---	---	---

Согласно результатам эксплуатационных испытаний (таблица 4.5) построен график (Рис.4.14).

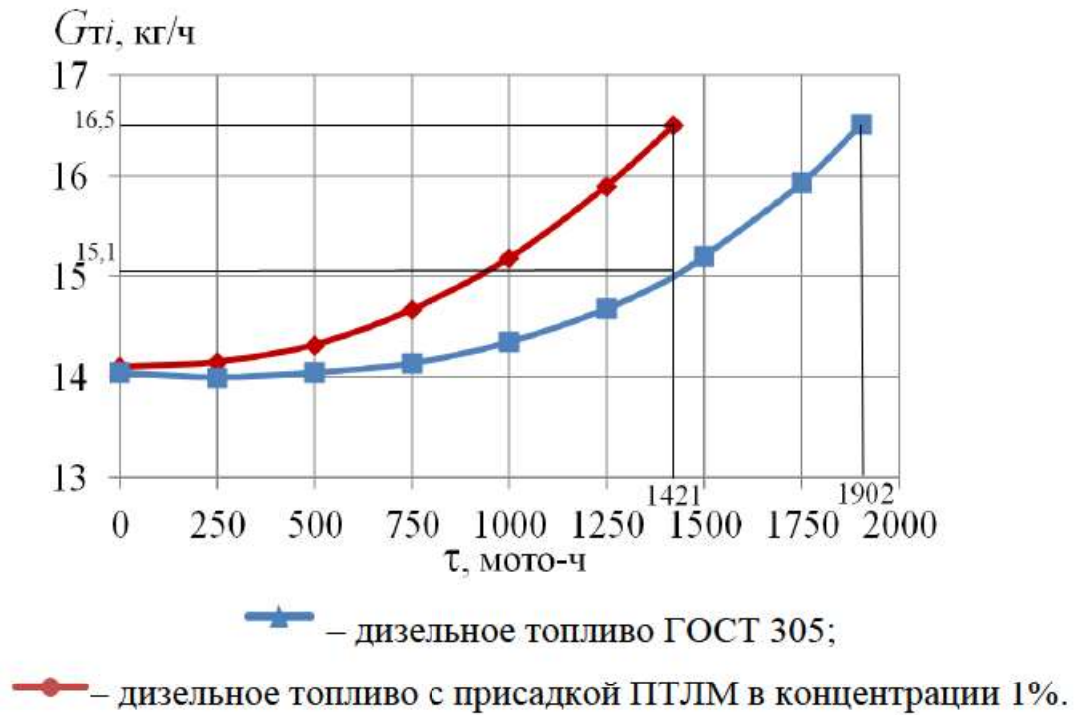


Рисунок 4.14 – Нарботка тракторов при эксплуатационных испытаниях форсунок ФД-22

Установлено, что при использовании дизельного топлива с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%, средняя наработка распылителей составила 1902 мото-часа. При использовании дизельного топлива ГОСТ 305 средняя наработка распылителей 1421 мото-час. В результате эксплуатационных испытаний форсунок ФД-22 при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1% наработка распылителей повысилась на 25–30%. Таким образом применение присадки ПТЛМ к дизельному топливу в концентрации 1% обеспечивает работоспособное состояние распылителей форсунок с гидравлически управляемым запорным клапаном на протяжении 1902 мото-часа. Из этого следует вывод о возможности обеспечения работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей применением присадки к дизельному топливу.

ГЛАВА 5. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С ПРИСАДКОЙ ПТЛМ

5.1 Расчет экономической эффективности применения присадки ПТЛМ

Экономическую эффективность применения дизельного топлива с присадкой ПТЛМ проведена по результатам эксплуатационных испытаний на предприятиях АПК в ООО «ПОЛТАВА» и в КФХ «Бабенко Лариса Фёдоровна» Таврического района Омской области, на тракторах марки МТЗ-80/82. Тракторы работали на дизельном топливе ГОСТ 305 и на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%. По результатам исследований, изложенных в главе 4 диссертации. Испытания проводили до предельной наработки распылителей форсунок. Двигатели тракторов были оснащены новыми форсунками ФД-22. Плунжерные пары ТНВД были заменены на новые. Замер расхода топлива проводили при помощи датчиков расхода дизельного топлива «Расходомер DFM 100B».

Результаты исследования приведены в таблице 5.1.

Таким образом, годовой эффект $\mathcal{E}_Г$ (руб.) от применения присадки ПТЛМ в концентрации 1% определяли путём сравнения прямых затрат на топливо G , кг/ч при эксплуатации тракторов на дизельном топливе и дизельном топливе с присадкой ПТЛМ 1%, по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_Г = \sum_{i=1}^n \bar{G}_{рДТ} Ц_{ДТ} - \sum_{i=1}^n \bar{G}_{рДТ+ПТЛМ} Ц_{ДТ+ПТЛМ} \quad (5.1)$$

где $\bar{G}_{рДТ}$ – средний расход дизельного топлива, кг/ч;

$\bar{G}_{рДТ+ПТЛМ}$ – средний расход дизельного топлива с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%, кг/ч;

$Ц_{ДТ}$ – цена на товарное дизельное топливо, руб.;

$Ц_{ДТ+ПТЛМ}$ – цена на дизельное топливо с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%, руб.

Затраты на дизельное топливо $Z_{ДТ}$ равны произведению количества израсходованного дизельного топлива (кг), на его оптовую цену. Оптовая цена дизельного топлива ГОСТ 305 в Омской области составила 46,00 руб./кг.

Затраты на дизельное топливо с присадкой ПТЛМ $Z_{ДТ+ПТЛМ}$ состоят из затрат непосредственно на дизельное топливо, и затрат на компоненты присадки:

- талловое масло ТУ 13-00281074-26 [139] - 167 руб.;
- льняное масло ГОСТ 5791 [36] - 91 руб.;
- полиалкилбензол ТУ 2414-025-05766480-2006 [114] - 307 руб.

Соотношение компонентов присадки ПТЛМ (талловое масло : льняное масло : полиалкилбензол) (55:41:4 соответственно).

$$C_{ПТЛМ} = (C_{ТАЛЛМ} \cdot 0,55 + C_{ЛЬНЯНМ} \cdot 0,41 + C_{ПОЛИАЛ} \cdot 0,04) \cdot 0,01 + (46 \cdot 0,99) \text{ руб.}$$

$$C_{ПТЛМ} = (167 \cdot 0,55 + 91 \cdot 0,41 + 307 \cdot 0,04) \cdot 0,01 + (46 \cdot 0,99) = 46,9544 \approx 47 \text{ руб.}$$

Таким образом, цена дизельного топлива с присадкой с учётом расходов на приобретение компонентов и изготовление составляет 47 руб./кг.

По результатам эксплуатационных испытаний распылителей расчёт расхода топлива был проведен по этапам, указанным в таблице 1.

Таблица 5.1 – Эксплуатационные испытания распылителей форсунок ФД-22 при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%

Наработка Распылителей τ , мото-ч	0	250	500	750	1000	1250	1421	1500	1750	1902
Расход ДТ, (кг/ч)	14,1	14,2	14,3	14,7	15,2	15,9	16,5	---	---	---
Расход ДТ+1%ПТЛМ, (кг/ч)	14	14	14,1	14,1	14,3	14,7	15	15,2	15,9	16,5
Средний расход ДТ, (кг/ч)		14,1	14,2	14,5	14,9	15,5	16,2	---	---	---
Средний расход ДТ+1%ПТЛМ, (кг/ч)		14	14	14,1	14,3	14,5	14,8	---	---	---

Суммарный средний расход топлива, за время эксплуатации, определен по формуле:

$$\bar{G}_p = \sum_{i=1}^n \bar{G}_{Ti} \cdot \tau_i . \quad (5.2)$$

где \bar{G}_{Ti} – где средний расход топлива на i -м этапе, кг/ч;
 τ_i – наработка на i -м этапе, мото-ч.

Используя данные в таблице 1, суммарный средний расход топлива (по формуле (5.4)) за время эксплуатации составит:

- при работе на дизельном топливе:

$$\bar{G}_{pдг} = (14,1 \cdot 250 + 14,2 \cdot 250 + 14,5 \cdot 250 + 14,9 \cdot 250 + 15,5 \cdot 250 + 16,2 \cdot 171) = 21\ 070$$

- при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%:

$$\bar{G}_{pдг+птлм} = (14 \cdot 250 + 14 \cdot 250 + 14,1 \cdot 250 + 14,3 \cdot 250 + 14,5 \cdot 250 + 14,8 \cdot 171) = 20\ 080$$

Затраты на дизельное топливо определяли по формуле:

$$З_{дг} = \bar{G}_{pдг} \cdot Ц_{дг} \quad (5.3)$$

Затраты на топливо с присадкой ПТЛМ определяли по формуле:

$$З_{дг+птлм} = \bar{G}_{pдг+птлм} \cdot Ц_{дг+птлм} \quad (5.4)$$

Затраты на дизельное топливо составляют:

$$З_{дг} = 21\ 070 \cdot 46 = 969\ 220 \text{ руб.}$$

Затраты на топливо с присадкой ПТЛМ составляют:

$$З_{дг+птлм} = 20\ 080 \cdot 47 = 951\ 985 \text{ руб.}$$

Экономический эффект от применения дизельного топлива с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%:

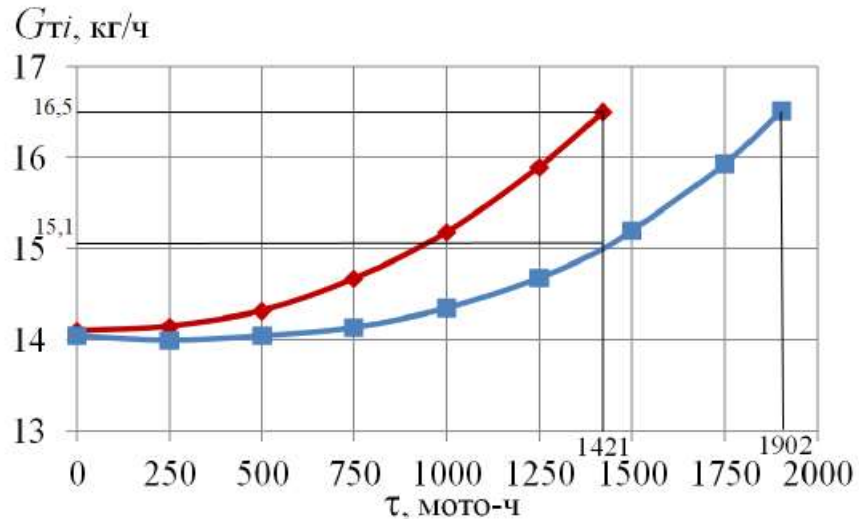
$$\mathcal{E}_Г = \sum_{i=1}^n \bar{G}_{pдг} \cdot З_{дг} - \sum_{i=1}^n \bar{G}_{pдг+птлм} \cdot З_{дг+птлм} \quad (5.5)$$

$$\mathcal{E}_Г = 969\ 220 - 951\ 985 = 17\ 235 \text{ руб}$$

Таблица 5.2 – Экономическая эффективность от использования дизельного топлива с присадкой ПТЛМ

Наработка распылителей τ , мото-ч	0	250	500	750	1000	1250	1421	1500	1750	1902
Расход ДТ, (кг/ч)	14,1	14,2	14,3	14,7	15,2	15,9	16,5	---	---	---
Расход ДТ+1%ПТЛМ, (кг/ч)	14	14	14,1	14,2	14,4	14,7	15	15,2	15,9	16,5
Средний расход ДТ, (кг/ч)	---	14,1	14,3	14,5	15	15,5	16,2	---	---	---
Средний расход ДТ+1%ПТЛМ, (кг/ч)	---	14	14,1	14,2	14,3	14,5	15	---	---	---
Цена ДТ ($C_{дт}$, руб/кг)	46									
Цена ДТ+ПТЛМ 1% ($C_{дт+птлм}$, руб/кг)	47									
Расход ДТ по этапам, (кг)	---	3525	3550	3625	3725	3875	2770	---	---	---
Расход ДТ+ПТЛМ 1% по этапам, (кг)	---	3500	3500	3525	3575	3625	2530	---	---	---
Стоимость ДТ, ($C_{дт}$), руб	---	16215 0	16330 0	166750	1713 50	1782 50	1274 20	---	---	---
Стоимость ДТ+ПТЛМ 1% ($C_{дт+птлм}$), руб	---	16450 0	16450 0	165675	1680 25	1703 75	1189 10	---	---	---
Экономический эффект ($\Delta\tau$), руб.:	---	-2350	-1200	1075	3325	7875	8510	17 235		

По результатам таблицы 5.1 построен график среднего расхода тракторов при эксплуатационных испытаниях форсунок ФД–22 на дизельном топливе ГОСТ 305 и на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%, (Рис. 5.1):



—●— дизельное топливо ГОСТ 305

—■— дизельное топливо с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%

Рисунок 5.1 – Средний расход топлива тракторов при эксплуатационных испытаниях форсунок ФД–22

Анализ графика показывает, в начале исследования (0-100 мото-часов) средний расход дизельного топлива с присадкой ПТЛМ не превышал 1,5% от среднего расхода дизельного топлива ГОСТ 305.

Уже на первом этапе (100 мото-часов), средний расход дизельного топлива превысил средний расход топлива с присадкой на 0,36%.

На втором этапе (500 мото-часов), средний расход дизельного топлива превысил средний расход топлива с присадкой на 2%.

На третьем этапе (1000 мото-часов), средний расход дизельного топлива превысил средний расход топлива с присадкой на 5,5%.

На четвертом этапе (1421 мото-час) – предельная наработка распылителей, работающих на дизельном топливе), средний расход дизельного топлива превысил средний расход топлива с присадкой на 10%.

Таким образом, в ходе эксплуатационных испытаний распылителей форсунок ФД-22 при работе на дизельном топливе и на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1% установлено:

- средняя наработка распылителей, работающих на дизельном топливе ГОСТ 305, составляет 1421 мото-час;

- средняя наработка распылителей, работающих на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%, составляет 1902 мото-часа;

По результатам расхода топлива и оценка гидроплотности следует вывод о снижении величины утечек топлива через прецизионные пары распылителей, в результате повышения вязкости и плотности топлива, и образования защитной демпферной пленки в сопряжении «игла - корпус распылителя» форсунки применением в дизельном топливе присадки ПТЛМ в концентрации 1%.

Экономическая эффективность получена за счет снижения утечек через сопряжение «игла - корпус распылителя» форсунки применением дизельного топлива с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%, что обеспечило работоспособные состояния прецизионных пар деталей распылителей форсунок при наработке 1902 мото-часов. При этом, с учётом снижения расхода топлива, экономический эффект составил: 17 235 руб.

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 (таловое 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.2.8), 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. Техническая новизна подтверждена патентом на полезную модель. 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-часов больше, чем на товарном дизельном топливе ГОСТ-305.

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 17235 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 ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРИСАДКИ ПТЛМ К ДИЗЕЛЬНОМУ ТОПЛИВУ

Талловое, льняное масла и полиалкилбензол полностью растворяются в дизельном топливе при простом механическом смешивании компонентов. Технология приготовления присадки к малосернистому дизельному топливу проста и не требует больших дополнительных затрат.

Присадку к дизельному топливу готовят следующим способом. В чистый бак с герметичной крышкой помещают компоненты присадки: дистиллированное талловое масло ГОСТ 14845 – 55%, дистиллированное льняное масло ГОСТ 5791– 41% , полиалкилбензол ТУ 2414-025-05766480-2006 – 4%. Устанавливают перемешивающий насос и закрывают крышкой для предотвращения процесса окисления компонентов присадки. Подогревают смесь компонентов до температуры 55–60°С и перемешивают в течении 15 минут. Затем смешивают дизельное топливо с полученной присадкой в соотношении 99:1 % и перемешивают в течении 30 минут с последующим охлаждением до комнатной температуры. Полученное топливо отправляют на хранение при температуре от –5 до +20 °С. Допускается прямое смешивание без применения дополнительного оборудования прямо в баке трактора, предотвратив попадание пыли и грязи в топливный бак. Талловое масло,

льняное масло и полиалкилбензол, залитые в емкость с дизельным топливом, растворяются в последнем через 1,5...2 минуты без перемешивания. Перемешивание компонентов затруднено при низких температурах окружающей среды, что обуславливается увеличением вязкости дизельного топлива и растительных масел. Исходя из этого, рекомендуется приготавливать присадку в отапливаемом помещении. Дизельное топливо легированное присадкой можно использовать для питания ДВС тракторов, комбайнов и другой мобильной и стационарной техники без изменения системы питания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамов, С.В. Обеспечение работоспособности топливной аппаратуры тракторных и комбайновых дизелей путем улучшения очистки топлива [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05. 20. 03 / С.В. Абрамов. – Саратов, 2006. – 124 с.
2. Алексеев, В.Н. Топлива и смазочные материалы для автомобилей [Текст] : В помощь строителям БАМ / В.Н. Алексеев, И.Ф. Кувайцев. – М. : Транспорт, 1976. – 95 с.
3. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика [Текст]/ А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселёв. - М.: Стройиздат, 1965. - с
4. Анисимов, И.Г. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник / И.Г. Анисимов, К.М. Бадыштова, С.А.Биатов и др. М.: Техинформ, 1999.
5. Антипов, В.В. Износ прецизионных деталей и нарушение характеристики топливной аппаратуры дизелей / В.В. Антипов. - 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1972. – 177 с.
6. Антипов, В.В. Ремонт и регулирование топливной аппаратуры двигателей тракторов и комбайнов / В.В. Антипов, Б.А. Гоголев, Б.П. Загородских. -М.: Россельхозиздат, 1978. 126 с.].

7. Антипов, И.А. Улучшение экологических и эксплуатационных свойств автомобильных бензинов [Текст] / И.А. Антипов, В.Е.Емельянов // Мир нефтепродуктов - 2005 - №5 - С. 37- 40.
8. Артемьев, Ю.Н. Основы надёжности сельскохозяйственной техники [Текст] / Ю.Н. Артемьев. - М.: МИИСП, 1973. - 163с.
9. Астахов, И.В. Подача и распыливание топлива в дизелях [Текст] / И.В. Астахов, В.И. Трусов, А.С. Хачиян. - М.: Машиностроение, 1971.-359с.
10. Астахов, И.В. Топливные системы и экономичность дизелей [Текст] / И.В. Астахов, Л.Н. Голубков, В.И. Трусов.- М.: Машиностроение, 1990.-288с.
11. Астахов, И. В. Физические основы процесса впрыска топлива в дизелях / И. В. Астахов // Труды / Моск. автодорож. ин-т. – М., 1979. – Т. 3. - С. 37-52.
12. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения /А.С. Ахматов. – М. : Физматгиз, 1963. – 472 с.
13. Ачкасов, К.А. Справочник начинающего слесаря : Ремонт и регулирование приборов системы питания и гидросистемы тракторов, автомобилей, комбайнов / К.А. Ачкасов, В.П. Вегера. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1987. – 356
14. Бахтиаров, Н.И. Повышение надёжности работы прецизионных пар топливной аппаратуры дизелей[Текст] / Н.И. Бахтиаров, В.Е. Логинов, И.И. Лихачев. – М. : Машиностроение, 1972. – 286 с.
15. Баширов, Р.М. Исследование неравномерности подачи топлива / Р.М. Баширов, И.И. Габитов // Тракторы и сельхозмашины. – 1992. – № 3. – С. 15-17.
16. Баширов, Р.М. Надёжность топливной аппаратуры тракторных и комбайновых дизелей / Р.М. Баширов, В.Г. Кислов, В.А. Павлов. – М. : Машиностроение, 1978. – 184 с.
17. Белявцев, А.В. Топливная аппаратура автотракторных дизелей / А.В. Белявцев, А.С. Процеров. – М. : Росагропромиздат, 1988. – 223 с.

18. Березников, А. И. О корреляции между интенсивностью изнашивания и силой трения [Текст] / А. И. Березников //Трение и износ - 2001 - №6, Том 22 - С. 619-624.
19. Большаков, В.Ф. Эксплуатация судовых среднеоборотных дизелей.[Текст]/ В.Ф. Большаков, Ю.Я.Фомин, В.И. Павленко. - М.: Транспорт, 1983. - 160 с.
20. Борзенков, В.А. Нефтепродукты для сельскохозяйственной техники : справочник [Текст] / В. А. Борзенков [и др.]. – М. : Химия, 1988. – 288 с.
21. Боуден, Ф.П. Трение и смазка твёрдых тел [Текст]/ Ф.П. Боуден, Д. Тейбор. - М.: Машиностроение, 1968. - 544с
22. Брилинг, Н.Р. Быстроходные дизели [Текст] / Н.Р. Брилинг, М.М. Вихерт, И.И. Гутерман. - М. : Машгиз, 1951. - 520 с.
23. Буяновский И.А., Фукс И.Г., Шабалина Т.Н. Граничная смазка: этапы развития трибологии: Монография.- М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002.- 230 с. :ил.
24. Быченин, А.П. Повышение ресурса плунжерных пар топливного насоса высокого давления тракторных дизелей применением смесового минерально-растительного топлива [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03/ Быченин Александр Павлович. - Пенза, 2007. - 172.
25. Веденяпин, Г.В. Общая методика экспериментальных исследований и обработки опытных данных[Текст] / Г.В. Веденяпин. - М.: Колос, 1973. - 199с.
26. Ветошкин, Е.Э. Влияние давления впрыскивания топлива на показатели работы дизеля при использовании топлив растительного происхождения. [Текст]/ Е.Э. Ветошкин, С.П. Кулманаков // Ползуновский альманах №3, Т1, 2017. - С.61-64.
27. Виноградов, В.Н. Изнашивание при ударе [Текст] / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, А.Ю. Албагачиев. - М.: Машиностроение, 1982. - 192с.

28. Вихерт, М. М. Топливная аппаратура автомобильных дизелей : конструкция и параметры / М. М. Вихерт, М. В. Мазинг. – М. :Машиностроение, 1978. – 176 с., ил.
29. Власов, П.А. Загрязненное топливо – причина износа / П.А. Власов, А.А. Новичков // Сельский механизатор. – 2007. – № 5. – С. 40.
30. Власов, П.А. Особенности эксплуатации дизельной топливной аппаратуры[Текст] / П.А. Власов. – М. : Агропромиздат, 1987. – 127 с.
31. Габитов, И. И. Топливная аппаратура автотракторных дизелей / И. И. Габитов, А. В. Неговора. – Уфа: БГАУ, 2004. – 216 с.
32. Гаврилов, Б.Г. Химизм предпламенных процессов в двигателях [Текст] / Б.Г. Гаврилов. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1970. - 182с.
33. Голев, В.И. Изнашивание запирающих конусов и прогнозирование ресурсов работы распылителя автотракторных дизелей / В.И. Голев, А.С. Русаков, Р.М. Мохов // Двигателестроение. - 1989. - № 12. - С. 20 - 23.
34. Горбаневский, В.Е. Дизельная топливная аппаратура. Оптимизация процесса впрыскивания, долговечность деталей и пар трения / В.Е. Горбаневский, В.Г. Кислов, Р.М. Баширов [и др.]. - М. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. - 140 с.
35. ГОСТ 18509-88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. Реферат и аннотация. - Взамен ГОСТ 18508-80 ГОСТ 18509-80 ГОСТ 25033-81 ; введ. 1990-01-01. - М. : ИПК Изд-во стандартов, 1990. - 77 с.
36. ГОСТ 5791-81. Масло льняное техническое. Технические условия. – Взамен ГОСТ 5791-66; введ. 1982-07-01. - М. : ИПК Изд-во Стандартиформ, 2011. – 9 с.
37. ГОСТ 305-2013. Топливо дизельное. Технический условия. – Взамен ГОСТ 305-73, ГОСТ 4749-73; введ. 2015-01-01. - М. : ИПК Изд-во Стандартиформ, 2015. – 7 с.
38. ГОСТ 305-2013 Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия.

39. ГОСТ 8670-82 Насосы топливные высокого давления автотракторных дизелей. Правила приемки и методы испытаний.
40. ГОСТ 9490-75. Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения трибологических характеристик на четырёхшариковой машине [Текст] / Введен 01.01.1978. - М.: Изд-во Стандартов, 19784 - 8с.
41. ГОСТ 33-2016. Нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости.
42. ГОСТ 3900-85. Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности.
43. ГОСТ 4333-87. Методы определения температур вспышки и воспламенения в открытом тигле. Введен 30.06.87 . - М.: Изд-во Стандартиформ, 1987. – 5 с.
44. ГОСТ 2477-2014. Метод определения содержания воды. Введен 14.11.2014. - М.: ИПК Изд-во Стандартов, 1987. – 6 с.
45. ГОСТ 10578-95. Насосы топливные дизельные. Введен 28.04.1997. - М.: ИПК Изд-во Стандартов, 2000. – 3 с.
46. ГОСТ Р 51069-97. Нефть и нефтепродукты. Метод определения плотности, относительной плотности и плотности в градусах API ареометром [Текст] / Введен 07.01.1998. - М.: Изд-во Стандартов, 2008. - 7с.
47. ГОСТ 27.502 - 1984. Надёжность в технике. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений. Введен 01.01.1993. - М.: Изд-во Стандартов, 2004. - 23с.
48. ГОСТ Р 50779.22-2005 Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего. / Введен 01.07.2005. - М.: Изд-во Стандартов, 2005. - 15с.
49. ГОСТ 6321- 92. Топливо для двигателей. Метод испытания на медной пластинке. Введен 01.01.1993. - М.: Изд-во Стандартов, 2004. - 11с.
50. ГОСТ 10579-88. Форсунки дизелей. Общие технические условия [Текст] /. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 23 с.

51. ГОСТ 19932 - 99. Нефтепродукты. Определение коксуемости методом Конрадсона. Введен 01.01.2001. - М.: Изд-во Стандартов, 1999. - 7с.
52. Грехов, Л. В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей : Учебник для вузов / Л. В. Грехов. – 2-е изд. – М. : Легион-Автодата, 2005. – 344 с. : ил.
53. Гриднев Г.Ф. Исследование и разработка метода ускоренных испытаний на отказ распылителей штифтовых форсунок тракторных двигателей. -Автореф. дис.канд. техн. наук. — Л., 1969. 23 с.
54. Гриб, В.В. Лабораторные испытания материалов на трение и износ [Текст] / В.В. Гриб, Г.Е Лазарев. - М. Изд-во «Наука» 1968. – 73с.
55. Григорьев М. А. Обеспечение надежности двигателей [Текст] / М. А. Григорьев, В. А. Долецкий. – М. : Стандарты, 1978. – 324 с.
56. Громаковский, Д.Г. Концептуальный подход в задачах обеспечения высокой износостойкости поверхностей узлов трения [Текст] / Д.Г. Громаковский. -сборник трудов МНТК «Актуальные проблемы трибологии». Том 1. — М.: Машиностроение, 2007. - С. 155 - 167.
57. Гуреев, А.А. Топливо для дизелей. Свойства и применение [Текст] / А.А. Гуреев, В.С. Азев, Г.М. Камфер. - М.: Химия, 1993. - 336 с.
58. Гурин Т.Ю. Повышение долговечности распылителей форсунок закрытого типа [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03/ Гурин Тимофей Юрьевич. - Омск, 2006. - 141.
59. Гурман, В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике [Текст] / В.Е. Гурман. - 6-е изд., доп. - М.: Высшая школа, 2002. - 405с.
60. Даманский, Р.В. Влияние добавки растительных масел в дизельное топливо на закоксовываемость распылителей форсунок / Р.В. Даманский, Л.С. Керученко / Сборник материалов X региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти доцента М.А. Анфиногенова: Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования. Новосибирск. 2018. С. 80-85.

61. Даманский, Р.В. Исследование параметров износа уплотняющего пояса 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.

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

63. Даманский, Р.В. Производство биодизельного топлива / Р.В. Даманский, Л.С. Керученко / Инновационные пути развития животноводства XXI века / Материалы научно-практической (заочной) конференции с международным участием. – Омск, 2015. – Омск : Изд-во ФГБНУ «Сибирский научно-исследовательский институт птицеводства», 2015. – 252 с.

64. Данилов, А.М. Применение присадок в топливах для автомобилей [Текст] : Справ. изд. / А.М. Данилов. — М.: Химия, 2000.-232с.

65. Дёмкин, Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей [Текст]/ Н.Б. Дёмкин. - М.: Наука, 1970. - 227с.

66. Демкин, Н.Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей [Текст] / Н.Б. Демкин . -М.: Изд-во АН СССР, 1962. - 112 с.

67. Дрюпин, П.В. Повышение долговечности плунжерных пар топливного насоса высокого давления тракторных дизельных двигателей [Текст]: дисс. канд. техн. наук: 05.20.03/ П.В. Дрюпин. - Омск: 2012. - 143с.

68. Дьяченко, П. Е. Площадь фактического контакта сопряженных поверхностей [Текст]/ П.Е. Дьяченко, Н.Н. Толкачёва, Г.А. Андреев, Т.М.Карпова. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. - 96 с.

69. Загородских, Б.П. Ремонт и регулирование топливной аппаратуры автотракторных и комбайновых дизелей[Текст] / Б.П.

Загородских, В.П. Лялякин, П.А. Плотников.–М.: ФГНУ «Росинформагротех, 2006 – 212 с.

70. Зеленихин А.И. Исследование процесса коксования сопловых отверстий распылителей при работе дизеля на бензодизельной смеси [Текст]: сб. науч. Тр/ А.И. Зеленихин. – Л.: ОНТИ ЦНИТА, 1966. – Вып.29. – С.6-12.

71. Ибатуллин, И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоёв: /И.Д. Ибатуллин.- Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008.-387с.

72. Икрамов, У.А. Износ основных деталей дорожных машин [Текст] / У.А. Икрамов, М.М. Ташпулатов. - Ташкент, ФАН, 1976.- 134с.

73. Икрамов, У.А. Взаимодействие абразивных частиц с идентичными по свойствам поверхностями трения [Текст]: Материалы научно - технического совещания " Контактная жёсткость в машиностроении / У.А. Икрамов, М.А. Левитин, М.М. Ташпулатов. - Куйбышев, 1977. - С.163-165.

74. Исследование возможности получения повышенных давлений впрыскивания топливо - подающей аппаратурой разделённого типа в автотракторных дизелях [Текст] / Л.В. Грехов, В.А. Марков, В.А. Павлов и др. // Вестник МГТУ. Серия "Машиностроение" . - 1997. - №1. - С.92-103.

75. Итинская, Н.И. Справочник по топливу, маслам и техническим жидкостям [Текст] / Н.И. Итинская, Н.А. Кузнецов. - М.: Колос, 1982.-208 с.

76. Ишутко, А.С. Противоизносные присадки к дизельным топливам. [Текст] / А.С. Ишутко, Д.Е. Кузьмин, Р.В. Даманский, Л.С. Керученко. В сборнике: Проблемы и перспективы разработки инновационных технологий. сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. 2018. С. 19-22.

77. Карпачев, В.В. Перспективная ресурсосберегающая технология производства ярового рапса: Методические рекомендации./В.В. Корпачев.- М.: ФГНУ Росинформагротех, 2008. - 60 с.

78. Карташевич, В.К. Классификация и основные направления развития систем автоматической защиты топливной аппаратуры дизелей от воды [Текст] / А.Н. Карташевич, В.К. Кожушко, Л.И. Крепс // Двигателестроение. – 1989. – № 7. – С. 38-41.

79. Керученко, Л.С. Влияние неисправностей распылителей дизельных форсунок на процесс впрыска топлива / Л.С. Керученко, Р.В. Даманский // Международный научно-исследовательский журнал. –2017. – №1-4(55) с. 78-81.

80. 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.

81. Керученко, Л.С. Изменение зазора в запорном сопряжении распылителя форсунки двигателя / Л.С. Керученко, Т.Ю. Гурин, Р.В. Даманский // Журнал «Сельский механизатор» / Изд: ООО «Нива» М. –2017. с. 36-37.

82. 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. [Текст] В сборнике: 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.

83. Керученко Л.С. Математическая модель изменения гидравлической плотности распылителей форсунок автотракторных дизелей с запорным сферическим клапаном [Текст] / Л.С. Керученко, Т.Ю.Гурин, А.Н. Ерошенко: Материалы региональной научно-практической конференции посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО ОмГАУ имени

П.А.Столыпина - Перспективы технического сервиса для предприятий АПК.
- Омск, 2013.- с. 31-36.

84. Керученко, Л.С. Присадка к малосернистому дизельному топливу. Л.С. Керученко, Р.В. Даманский. Патент на изобретение 2725134 С1, 30.06.2020. Заявка № 2019122951 от 16.07.2019.

85. Керученко, Л.С. Стенд для испытания и регулировки форсунок. Л.С. Керученко, Р.В. Даманский. Патент на полезную модель RU 185642 U1, 13.12.2018. Заявка № 2018119852 от 29.05.2018.

86. Керученко, Л.С. Теоретическое исследование износа запорного сопряжения распылителя форсунки [Текст]/ Л.С. Керученко, Р.В. Даманский. Стратегия устойчивого развития регионов России: сборник материалов XXXVI всероссийской научно – практической конференции/ Под общ. Ред. С.С.Чернова.- Новосибирск. Издательство ЦРНС, 2016.- С.144-148.

87. Керученко, Л.С. Факторы, определяющие износ запорного сопряжения распылителя форсунки дизельного двигателя / Л.С. Керученко, И.В. Веретено, Р.В. Даманский // Вестник Омского ГАУ. –2016. № 2 (22). С. 222-227.

88. Китанин, В.Ф. Рекомендации по использованию топливных и смазочных материалов в сельскохозяйственном производстве. / В.Ф. Китанин, А.П. Уханов, Ю.В. Гуськов Пенза: Полиграфист, 1992. - 42 с.

89. Костецкий, Б.И. Механо - химические процессы при граничном трении [Текст] / Б.И. Костецкий, М.Э. Натансон, Л.И. Бершадский. - М.: Наука, 1972. - 171с.

90. Ковалев Л. Г. Перспективы применения клапанно-сопловых форсунок в автотракторных дизелях / Л. Г. Ковалев, Т. Ю. Гурин // Совершенствование технологий, машин и оборудования в АПК : сб. науч. тр. – Омск : Изд-во ФГОУ ВПО ОмГАУ, 2006. – 324 с. : ил.

91. Костин, А.К. Теплонапряжённость двигателей внутреннего сгорания [Текст] / А.К.Костин, В.В. Ларионов, Л.И. Михайлов. - Л.: Машиностроение, 1979. - 222 с.

92. Крагельский, И.В. Трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский. - М.: Машиностроение, 1968. -480 с.
93. Крагельский, И.В. Усталостный механизм и краткая методика аналитической оценки величины износа поверхностей трения при скольжении (исходя из свойств материалов и условий работы) [Текст] / И.В. Крагельский, Е.Ф. Непомнящий, Г.М. Харач - М.: АН СССР, 1967. -18с.
94. Кривенко, П.М. Дизельная топливная аппаратура / П.М. Кривенко, И.М. Федосов. – М. : Колос, 1970. – 536 с.
95. Кривенко, П. М. Ремонт дизелей сельскохозяйственного назначения [Текст] / П. М. Кривенко, И. М. Федосов. – М. : Агропромиздат, 1990. – 269 с.
96. Крутов, В. И. Топливная аппаратура автотракторных двигателей : учеб. пособие [Текст] / В. И. Крутов, В. Е. Горбаневский, В. Г. Кислов; под общ. ред. В. И. Крутова. – М.: Машиностроение, 1985. – 208 с.
97. Кузнецов, А.В. Топливо и смазочные материалы [Текст] / А.В. Кузнецов. – М.: КолосС, 2004. - 199 с.
98. Кузькин, В.Г. Динамика изнашивания и ресурс конических уплотнений распылителей форсунок дизелей. Повышение эффективности эксплуатации и энергетических установок, машин и оборудования [Текст]: Сб. научных трудов. /В.Г. Кузькин, А.В. Толмачёв. - Калининград: КГТУ, 1998. - С 58 - 68.
99. Курчаткин, В.В. «Надежность и ремонт машин» [Текст] / В.В. Курчаткин, Н.Ф. Тельнов, К.А. Ачкасов,. - М.: Колос, 2000. - 776 с.
100. Лазарев Е.А. «Основные совершенствования процесса сгорания топлива для повышения технического уровня тракторных дизелей». - Автореф дисс. др. н. — Л., 1987. 8 с.
101. Лазарев, В.Е. Математическая модель шероховатой поверхности контактного трибосопряжения [Текст] / В.Е. Лазарев, М.И. Грамм, Е.А. Лазарев и др. // Челябинск: Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение» .- 2006.-Вып.8.-№11(66).-С.54-59;

102. Лазарев, Е.А. Основные принципы, методы и эффективность средств совершенствования процесса сгорания топлива для повышения технического уровня тракторных дизелей [Текст]: учебное пособие / Е.А.Лазарев. - Челябинск: изд-во ЧГТУ, 1995. - 360с.

103. Лазарев, В.Е. Параметры и характеристики распылителя, используемые при оценке причин снижения работоспособности топливной форсунки дизеля [Текст] / В.Е.Лазарев // Челябинск: Вестник ЮУрГУ. Серия "Машиностроение".-2003.- Вып.3. №1(17). - С.33-36.

104. Ломаева, С.Ф. Механизмы формирования структуры, фазового состава и свойств наносистем на основе железа при механоактивации в органических средах [Текст] /С.Ф. Ломаева, дисс. докт. физ-мат. наук. - Ижевск, 2007. - 334с.

105. Ломоносов, Д.А. Повышение долговечности плунжерных пар дизельной топливной аппаратуры за счет контроля влагосодержания в топливной системе[Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05. 20. 03 / Д.А. Ломоносов. – М., 2007. – 18 с.

106. Лышевский, А.С. Питание дизелей [Текст] / А.С.Лышевский. - Новочеркасск, 1974. - 468с.

107. Лышко, Г.П. Топливо, смазочные материалы и технические жидкости [Текст] / Г.П. Лышко. – М. : Колос, 1979. – 256 с.

108. Нагорнов С.А. Восстановление качества некондиционных нефтепродуктов [Текст] / С.А. Нагорнов // Техника и оборудование для села. – 2006. - № 8. – С. 37-38.

109. Обельницкий, А.М. Топливо и смазочные материалы [Текст]: Учебник для втузов. - М.: Высшая школа, 1982. - 208 с.

110. ОСТ 23.1-364-81. Насосы топливные высокого давления тракторных и комбайновых дизелей. Метод ускоренных испытаний на надежность. - Взамен ОСТ 23.1-364-73 ; введ. 1982-01-07. – М. : Изд-во ЦНИТА, 1982. – 28 с.

111. Остриков, В.В. Топливо, смазочные материалы и технические жидкости [Текст] : учебное пособие / В.В. Остриков, С.А. Нагорнов, О.А. Клейменов [и др.]. - Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 304 с.

112. Перекрестов, А.П. К вопросу аналитического определения интенсивности изнашивания пары игла-седло форсунки при использовании малосернистых топлив [Текст] / А.П. Перекрестов, М.А. Саидов // Материалы конференции XXV Российской школы по проблемам науки и технологий, посвященной 60-летию победы — г. Миасс - 21-23 июня 2005 - С. 162 - 164.

113. Петриченко, Р.М. Физические основы внутрицилиндровых процессов в двигателях внутреннего сгорания. [Текст] / Р.М.Петриченко. -Л.: Изд - во ЛГУ, 1983. - 244с.

114. ТУ 2414-025-05766480-2006. Полиалкилбензол. Технические условия. Введ. 13.04.2007. - М. : Изд-во ФГУП НИИ «Синтез», 2007. – 6 с.

115. Постановление Правительства Российской Федерации, технический регламент «о требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту» / Электронный текст документа // Правительство РФ, 27 февраля 2008 года № 118

116. Разумов, И.Н. Справочные материалы к методическим указаниям по дисциплине «Эксплуатация машинно-тракторного парка» / И.Н. Разумов. - Кинель, 1987. - 224 с.

117. Русинов, Р. В. Конструкция и расчет дизельной топливной аппаратуры / Р.В. Русинов. – М. : Машиностроение, 1965. – 148 с.

118. Рыбаков, К.В. Влияние степени загрязнения топлива на работоспособность плунжерных пар / К.В. Рыбаков, Э.И. Удлер, М.Е. Кузнецов // Техника в сельском хозяйстве. – 1983. – № 10. – С. 46-47.

119. Рыбаков, К.В. Повышение чистоты нефтепродуктов [Текст] / К.В. Рыбаков, Т.П. Карпекина. – М. : Агропромиздат, 1986. – 110 с.

120. Саидов, М. А. Исследование влияния изнашивания конусного уплотнения распылителя форсунки судового дизеля на работоспособность

топливной аппаратуры [Текст] / М.А. Саидов дисс. канд. техн. наук, 05.08.05. - Астрахань, 2009. - 145с.

121. Свиридов, Ю.Б. Топливо и топливоподача автотракторных дизелей. [Текст] / Ю.Б. Свиридов, Л.В. Малявинский, М.М. Вишперт. - Л.: Машиностроение, 1979. - 248с.

122. Свешников, А.А. Теория вероятностей и случайных функций. Случайные величины [Текст] / А.А. Свешников. - Л.: Изд-во ЛПИ, 1980. - 72 с.

123. Селиванов, А. И. Дизельная топливная аппаратура [Текст]/ А. И. Селиванов. – М. : Сельхозгиз, 1954. – 47с.

124. Семёнов, Б.Н. Теоретические и экспериментальные основы применения в быстроходных дизелях топлив с различными физическими и химическими свойствами [Текст]: Автореф. дис. докт. техн. наук. - Л.: ЛКИ, 1978. - 44с.

125. Смирнов, Н.В. Краткий курс математической статистики для технических приложений [Текст] / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин - Барковский. - М.: Физматгиз, 1959. - 436.

126. Сорокин, Г.М. Виды износа при ударном контактировании поверхностей [Текст] / Г.М. Сорокин. - М.: Машиноведение, №3. - С. 111-115.

127. Сорокин, Г.М. Влияние механических свойств стали на износостойкость при ударе. [Текст] / Г.М. Сорокин // Металловедение и термическая обработка, №3, 1975. -С.64 - 66.

128. Статистические методы в инженерных исследованиях[Текст]: Лабораторный практикум / Под ред. Г.К.Круга. - М.: 1983. - 216с.

129. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем [Текст] / В.П. Тарасик - М.: Изд-во ИНФРА-М, 2013. - 584 с.

130. Ташпулатов, М.М. Обеспечение работоспособности топливоподающей аппаратуры дизелей / М.М. Ташпулатов. – Ташкент : Фан, 1990. – 128 с.

131. Тененбаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании [Текст] / М. М. Тененбаум. М. : Машиностроение, 1966. – 331.
132. Теория статистики [Текст] /Под ред. проф. Г.Л. Громыко. - 2 - е изд., перераб. и доп. - М.: ИНФРА - М, 2009. - 476с.
133. Терехов, А.С. Влияние закоксовывания сопловых отверстий распылителей топливоподающих форсунок на рабочий цикл дизеля [Текст] / А.С. Терехов, А.Н. Лаврик, Е.А. Лазарев // Научный вестник Челябинск: ЧВАИ, 2001. - Вып. 12. - с.37-41.
134. Терехов А.С. Восстановление показателей рабочего цикла дизелей безразборным удалением нагаро - смолистых отложений из топливных форсунок : Дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 : Челябинск, 2003. - 191 с.
135. Трелин, А.А. Основные показатели технического состояния форсунок - давление начала впрыска, качество распыливания топлива, герметичность и пропускная способность. [Текст] / А.А. Трелин, К.В. Трелина // Труды ГОСНИТИ. Т. 99. 2007. – С. 61-63.
136. Трусов, В. И. Форсунки автотракторных дизелей / В. И. Трусов, В. П. Дмитренко, Г. Д. Масляный. – М. : Машиностроение, 1977. – 167 с.
137. Толмачёв, А.В. Повышение ресурса распылителей форсунок судовых дизелей / А.В. Толмачёв, дисс. канд. техн. наук.
138. Топливная аппаратура тракторных и комбайновых двигателей [Текст] : справочник / Н.И. Бахтиаров [и др.]. – М. : Колос, 1981. – 208 с.
139. ТУ 13-00281074-26-95 Масло талловое дистиллированное первого и второго сорта. Технические условия. ТУ от 01 июля 1995 года №13-00281074-26-95 – М. : Изд-во Стандартиформ 2004. –3 с.
140. Файнлейб, Б.Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей [Текст] : учеб. пособ. / Б.Н. Файнлейбн. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1990. – 352 с.

141. Файнлейб, Б.Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей [Текст]: Справочнике / Б.Н. Файнлейбн. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1990. – 350 с.
142. Фукс, Г.И. «О влиянии органических кислот на граничное трение и слипание твердых тел в углеводородных жидкостях» / [Текст]: Докл. АН СССР, ФХММ, №5, 551, 1969-1125с.
143. Фукс, Г.И. «Коллоидная химия нефти и нефтепродуктов / Г.И. Фукс, // Москва 1984. – 64 с.
144. Фукс Г.И. «Вязкость и пластичность нефтепродуктов» / «Современные нефтегазовые технологии» // Г.И. Фукс. Изд-во Институт компьютерных исследований. Москва-Ижевск.: 2003.
145. Хачиян, А.С. Доводка рабочего процесса автомобильных дизелей [Текст] / А.С. Хачиян, В.Р. Гальговский, С.Н. Никитин. - М.: Машиностроение, 1976. - 104с.
146. Хохлов, А.А. Обеспечение работоспособности топливной системы тракторных дизелей при использовании рыжико - минерального топлива[Текст]: дисс. канд. техн. наук: 05.20.03/ А.А. Хохлов. - Пенза: 2018. - 198с.
147. Чичинадзе, А.В. Основы трибологии [Текст] : учебник для ВУЗов / под ред. А.В. Чичинадзе. -М.: Наука и техника, 1995. - 778 с.
148. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка [Текст]: трибология и триботехника / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
149. Шумовский, В.А. Улучшение показателей транспортного дизеля совершенствованием процессов распыливания топлива и смесеобразования: дисс. ... канд. техн. наук. - М.:2016. - 168с.
150. Barris, M.A. Total Filtration: The Influence of on Engine Selection Wear, Emissions and Performance / M.A. Barris. – SAE Fuels and Lubricants. – 1995. – Paper 952557.

151. Beerbower, A. Lubrication in extreme environments / A. Beerbower, J.K. Appeldorn // Seventh world petroleum congress. Proceeding, Elsevier Publishing Co. – 1967. – Vol. 4. – Pp. 345 – 358.

152. Bhushan, B. Principles and applications of tribology / B. Bhushan. - A Wiley-Interscience Publication, 1999. - 1020 p.

153. Dimitroff, E. Low temperature engine studge: What? Where? How? / E. Dimitroff, R. D. Quillian. – SAE Paper 650225.

154. Grigg, C. Reformulated diesel fuels and fuel injection equipment / C. Grigg // New fuels and vehicles for cleaner air conference.–1994. - № 6. – P.11-12.

155. *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. – 2019. T. 8. № 5. С. 2174-2177.

156. Knothe G. Biodiesel derived from a model oil enriched in palmitoleic acid, macadamia nut oil G. Knothe energy and fuels. 2010. т. 24. № 3. с. 2098-2103.

157. Knothe, G. Lubricity of components of biodiesel and petrodiesel : The origin of biodiesel lubricity / G. Knothe, K. Steidley // Energy & Fuels. – 2005. - № 19. P. 1192-1200.

158. Lacey, P. Fuel lubricity reviewed / P. Lacey // Fall fuels and lubricants meeting and exposition. – 1998. - № 982567. – P. 19-22.

159. Murayama, T. Low Carbon Flower Buildup, Low Smoke, and Efficient Diesel Operation with Vegetable Oils by Conversion to Mono-Esters and Blending with Diesel Oil or Alcohols / T. Murayama, Y. Oh, N. Miyamoto, T. Chikahisa, N.

160. URL: <https://www.astm.org/Standards/D6079-RUS.htm> ASTM D6079 – 18. Стандартный метод оценки смазывающей способности дизельных топлив на установке с высокочастотным возвратно-поступательным движением. (дата обращения: 07.11.2017).

ПРИЛОЖЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2725134

**ПРИСАДКА К МАЛОСЕРНИСТОМУ ДИЗЕЛЬНОМУ
ТОПЛИВУ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина" (ФГБОУ ВО Омский ГАУ) (RU)*

Авторы: *Керученко Леонид Степанович (RU),
Даманский Роман Викторович (RU)*

Заявка № 2019122951

Приоритет изобретения 16 июля 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 30 июня 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 16 июля 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 185642

**СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ И РЕГУЛИРОВКИ
ФОРСУНОК**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина" (ФГБОУ ВО Омский ГАУ) (RU)*

Авторы: *Керученко Леонид Степанович (RU),
Даманский Роман Викторович (RU)*

Заявка № 2018119852

Приоритет полезной модели 29 мая 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 13 декабря 2018 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 29 мая 2028 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

Результаты определения цикловой и объемной подачи форсунками при частоте n вращения вала насоса УТН-5 с использованием дизельного топлива ГОСТ 305-2013 и топлива с добавлением 1% присадки ПТЛМ.

Таблица 3 - Изменение цикловой подачи топлива (по секциям) во время эксперимента, $q_{ц} \cdot 10^{-9}$ м³/цикл (при $n=500$ мин⁻¹)

Время, ч	ДТ (топливо дизельное летнее)				ДТ + 1% присадки			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0	144	164	152	138	166	151	162	178
10	136	153	147	127	152	145	156	167
20	128	149	131	121	146	134	147	152
30	120	136	122	114	135	125	137	145
40	114	128	114	107	123	122	128	139
50	109	119	108	102	116	119	117	126
60	101	107	93	96	110	109	108	114

Таблица 4 - Изменение объемной подачи топлива (по секциям) во время эксперимента, $V \cdot 10^{-6}$ м³, (при $n=500$ об/мин)

Время, ч	ДТ (топливо дизельное летнее)				ДТ + 1% присадки			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0	23,8	24,2	25,7	24,6	24,6	23,9	23,6	24,1
10	22,6	23,4	23,2	23,7	23,8	22,1	22,3	22,9
20	20,8	22,5	22,3	22,4	22,2	21,2	21,1	21,1
30	18,4	20,9	20,1	20,8	19,3	19,6	19,5	18,8
40	17,2	19,7	18,7	18,4	17,6	17,2	17,9	16,5
50	15,1	17,4	16,5	16,1	15,7	14,9	15,1	15,1
60	13,9	15,1	15,6	14,2	13,2	13,4	14,5	13,5

Таблица 5 - Изменение цикловой подачи топлива (по секциям) во время эксперимента, $q_{ц} \cdot 10^{-9}$ м³/цикл (при $n=850$ об/мин⁻¹)

Время, ч	ДТ (топливо дизельное летнее)				ДТ + 1% присадки			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0	103	97	116	108	102	93	110	102
10	94	94	111	97	99	90	101	96
20	89	87	98	91	96	89	97	91
30	81	82	92	84	80	85	87	88
40	79	75	84	79	74	76	81	81
50	74	69	79	73	68	64	76	78
60	68	62	71	68	61	62	64	70

Таблица 6 - Изменение объемной подачи топлива (по секциям) во время эксперимента, $V \cdot 10^{-6}$ м³, (при $n=850$ об/мин)

Время, ч	ДТ (топливо дизельное летнее)				ДТ + 1% присадки			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0	29,4	28,7	28,1	28,7	30,1	29,2	29,8	28,4
10	28,4	27,2	26,4	27,2	29,2	28,5	27,8	27,7
20	27,5	26,5	24,3	26,3	27,6	27,4	25,4	26,4
30	25,6	24,8	22,6	24,8	25,4	26,1	23,9	24,5
40	23,1	22,6	21,5	22,4	23,7	24,7	22,7	23,4
50	21,2	21,1	20,6	21,6	21,3	22,6	21,1	21,9
60	19,6	20,3	19,8	20,1	19,4	20,4	20,3	20,8

Таблица 7 - Изменение цикловой подачи топлива (по секциям) во время эксперимента, $q_{ц} \cdot 10^{-9}$ м³/цикл (при n=1100 об/мин)

Время, ч	ДТ (топливо дизельное летнее)				ДТ + 1% присадки			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0	63,2	66,7	67,4	63,6	65,9	64,7	65,1	65,5
10	62,3	65,4	66,3	62,7	64,6	63,6	64,0	64,7
20	62,1	64,2	65,4	61,6	63,7	62,5	63,3	63,6
30	61,4	63,6	64,6	60,9	62,5	61,5	62,2	62,7
40	60,3	62,2	62,2	57,8	61,9	60,0	61,1	61,3
50	59,8	61,5	58,7	55,6	60,1	58,5	59,6	59,6
60	56,4	57,2	56,4	52,3	58,4	56,4	58,2	57,5

Таблица 8 - Изменение объемной подачи топлива (по секциям) во время эксперимента, $V \cdot 10^{-6}$ м³, (при n=1100 об/мин)

Время, ч	ДТ (топливо дизельное летнее)				ДТ + 1% присадки			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0	36,7	37,4	35,9	36,2	36,9	36,8	35,3	36,7
10	36,1	36,8	35,1	35,7	36,2	36,3	34,9	36,2
20	35,6	36,1	34,7	35,1	35,7	35,4	34,6	35,8
30	34,9	35,6	34,3	34,8	35,3	35,1	33,8	35,1
40	34,3	35,2	32,2	33,3	34,1	34,3	32,4	34,2
50	32,2	34,4	31,3	32,7	32,6	33,4	31,2	32,6
60	30,2	32,4	30,8	30,1	30,8	32,6	30,6	30,4



АКТ

УТВЕРЖДАЮ:
 Заместитель генерального директора
 ООО «ПОЛТАВА»
 Ю.А. Островский
 «7» октября 2019 года

внедрения научно – исследовательской работы

Настоящий акт составлен комиссией в составе заместителя генерального директора ООО «ПОЛТАВА» Таврического района Омской области Ю.А. Островского, и сотрудников ФГБОУ ВО Омский ГАУ им. П.А. Столыпина: заведующего кафедрой «Агроинженерия», к.т.н. В.В. Мяло, доцента кафедры «Агроинженерия», к.т.н. Л.С. Керученко, ассистента кафедры «Агроинженерия» Р.В. Даманского о том, что в ООО «ПОЛТАВА» на тракторах марки МТЗ-80/82 проведены эксплуатационные испытания распылителей форсунок ФД-22 при эксплуатации на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%, и на тракторах этой же марки – на дизельном топливе, соответствующему ГОСТ 305-2013. Тракторы эксплуатировались в период с 2018 по 2019 г.г.

По результатам эксплуатационных испытаний установлено:

- при эксплуатации на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1%, наработка распылителей каждого трактора составила: 1891, 1901, 1912 и 1905 мото-ч (средняя наработка распылителей 1902 мото-ч);
- при эксплуатации на дизельном топливе, соответствующему ГОСТ 305-2013, наработка распылителей каждого трактора составила: 1435, 1416 и 1412 мото-ч (средняя наработка распылителей 1421 мото-ч).




Таким образом, средняя наработка распылителей форсунок ФД-22 при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1% превысила среднюю наработку распылителей, работающих на дизельном топливе, соответствующему ГОСТ 305-2013, на 25-30%.

Комиссия считает, что результаты исследования обеспечения работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей применением присадки ПТЛМ к дизельному топливу в концентрации 1% можно рекомендовать к внедрению на производство.

Зав. кафедрой «Агроинженерия», к.т.н., доцент

Доцент кафедры «Агроинженерия», к.т.н.

Ассистент кафедры «Агроинженерия»

 В.В. Мяло
 Л.С. Керученко
 Р.В. Даманский

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ П.А. СТОЛЫПИНА»**



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по образовательной
деятельности

Кандидат сельскохозяйственных наук

С.Ю. Комарова
«10» декабря 2019 года

АКТ

о внедрении результатов научно – исследовательской работы

Даманского Романа Викторовича в учебный процесс

Мы, ниже подписавшиеся, декан факультета технического сервиса в АПК, канд. техн. наук, доцент Е.В. Демчук, зав. кафедрой «Агроинженерия», канд. техн. наук, доцент В.В. Мяло, преподаватель дисциплины «Тракторы и автомобили», старший преподаватель С.В. Захаров, председатель методической комиссии по направлению 35.03.06 «Агроинженерия», старший преподаватель А.Г. Кулаева составили настоящий акт о том, что в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина» в учебный процесс кафедры «Агроинженерия» внедрена методика определения зависимости гидроплотности прецизионных пар распылителей форсунок автотракторных дизельных двигателей от концентрации присадки ПТЛМ.

Методика определения гидроплотности прецизионных пар распылителей форсунок автотракторных дизельных двигателей включена в дисциплину «Тракторы и автомобили» для обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия».

Установка для испытания и регулировки распылителей форсунок используется при выполнении лабораторных работ, выпускных квалификационных работ бакалавров, а также при выполнении учебно-исследовательских работ.

Декан факультета ТС в АПК к.т.н, доцент

Е.В. Демчук
Е.В. Демчук

Зав. кафедрой агроинженерии к.т.н, доцент

В.В. Мяло
В.В. Мяло

Ст. преподаватель

С.В. Захаров
С.В. Захаров

Председатель методической комиссии, ст. преподаватель

А.Г. Кулаева
А.Г. Кулаева



УТВЕРЖДАЮ:

Директор

ФГБУ «Сибирская МИС»

В.Н. Тимофеев

«22» марта 2018 года

АКТ

о проведении стендовых моторных испытаний двигателя Д-240 на дизельном топливе
с присадкой ПТЛМ

Комиссия в составе – директор Федерального государственного бюджетного учреждения «Сибирская государственная зональная машиноиспытательная станция» Таврического района Омской области Тимофеев Владимир Николаевич и сотрудники ФГБОУ ВО «Омский ГАУ им. П.А. Столыпина»: заведующий кафедрой «Агроинженерия», к.т.н., доцент В.В. Мяло, доцент кафедры «Агроинженерия» к.т.н. Л.С. Керученко, ассистент кафедры «Агроинженерия» Р.В. Даманский составили настоящий акт о том, что в 2018 году в ФГБУ «Сибирская МИС» Таврического района Омской области проведены стендовые моторные испытания рабочего процесса двигателя Д-240 трактора МТЗ – 80 с подтверждением работоспособности на дизельном топливе ГОСТ 305-2013 с присадкой ПТЛМ.

Испытания проведены на германском электротормозном стенде RAPIDO, предназначенном для испытаний и обкатки двигателей внутреннего сгорания. Целью стендовых моторных испытаний двигателя Д-240 являлось подтверждение работоспособности и исследование рабочего процесса двигателя при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1% и 3%. Во время испытаний были сняты внешние регуляторные характеристики двигателя в соответствии с ГОСТ 18509-88 для сравнения их с паспортными.

По результатам стендовых моторных испытаний двигателя Д-240 при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 3% было установлено:

- снижение эффективной мощности двигателя на 1,3%;
- увеличение удельного эффективного расхода топлива на 3,6%.

Результаты испытаний двигателя Д-240 при работе на дизельном топливе с присадкой ПТЛМ в концентрации 1% соответствуют результатам работы двигателя на дизельном топливе ГОСТ 305-2013.

Зав. кафедрой «Агроинженерия», к.т.н, доцент

В.В. Мяло

Доцент кафедры «Агроинженерия» к.т.н.,

Л.С. Керученко

Ассистент кафедры «Агроинженерия»

Р.В. Даманский



УТВЕРЖДАЮ:
Глава КФХ
«Бабенко Лариса Фёдоровна»
Л.Ф. Бабенко
« 23 » октября 2019 года

АКТ

внедрения в производство присадки ПТЛМ к дизельному топливу

Настоящий акт составлен комиссией в составе Главы крестьянского (фермерского) хозяйства «Бабенко Лариса Фёдоровна» Таврического района Омской области в лице Ларисы Фёдоровны Бабенко и сотрудников ФГБОУ ВО Омский ГАУ им. П.А. Столыпина: заведующего кафедрой «Агроинженерия», к.т.н. В.В. Мяло, доцента кафедры «Агроинженерия» к.т.н. Л.С. Керученко, ассистента кафедры «Агроинженерия» Р.В. Даманского о том, что Глава КФХ Бабенко Лариса Фёдоровна приняла к внедрению присадку ПТЛМ на основе растительных масел к дизельному топливу для обеспечения работоспособного состояния прецизионных пар распылителей форсунок дизельных двигателей с целью повышения долговечности топливной системы. Испытания проводились на тракторах марки МТЗ-80/82 в период с 2018 по 2019 г.г.

Внедрение присадки ПТЛМ позволило обеспечить работоспособное состояние прецизионных пар распылителей форсунок ФД-22 при средней наработке 1900 мото-ч, снизить расход топлива и сократить затраты на ремонт топливной системы. Экономический эффект в результате использования присадки ПТЛМ составил 17 235 руб.

Комиссия считает, что присадка ПТЛМ к дизельному топливу принята к внедрению в КФХ «Бабенко Лариса Фёдоровна».

Зав. кафедрой «Агроинженерия», к.т.н, доцент

В.В. Мяло

Доцент кафедры «Агроинженерия», к.т.н.

Л.С. Керученко

Ассистент кафедры «Агроинженерия»

Р.В. Даманский