

На правах рукописи

Сафонов Константин Валентинович

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ДВИГАТЕЛЕЙ
АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ
РЕМОНТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
ДОБАВКИ К МОТОРНОМУ МАСЛУ**

Специальность 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова».

Научный руководитель	Шишурин Сергей Александрович доктор технических наук, доцент
Официальные оппоненты:	Хохлов Алексей Леонидович , доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный аграрный университет им. Столыпина П.А.»
	Курбаков Иван Иванович , кандидат технических наук, доцент кафедры «Мобильные энергетические средства и сельскохозяйственные машины» института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва»
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет»

Защита состоится «__» _____ 2024 года в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.035.03 на базе ФГБОУ «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова» и на сайте: <http://www.vavilovsar.ru/>.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, пр. им. Петра Столыпина, 1, ученому секретарю диссертационного совета 35.2.035.03, [e-mail:chekmarev.v@yandex.ru](mailto:chekmarev.v@yandex.ru).

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

**Ученый секретарь
диссертационного совета**

Василий Васильевич Чекмарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Эффективность работы автомобилей зависит от их основных показателей, таких, как безотказность, долговечность, мощность и экономичность. Однако опыт эксплуатации автомобильного парка РФ показывает, что существенная их часть эксплуатируется с неисправностями, от которых в первую очередь зависит надежность работы техники.

Доля затрат на технический сервис в себестоимости автомобильных перевозок составляет 12–15 %. В результате за весь срок службы автомобиля затраты на обеспечение его работоспособности в 5–6 раз превышают затраты на его изготовление.

В настоящее время большинство предприятий АПК не имеют средств на систематическое обновление парка техники, а также качественное и своевременное проведение операций технического сервиса. Это обуславливает заинтересованность технических служб предприятий в инновационных методах ремонта и технического обслуживания агрегатов машин, способных обеспечить их высокую надежность в процессе эксплуатации.

Анализ неисправностей по системам и агрегатам, возникающих в процессе эксплуатации автомобилей семейства КАМАЗ, показал, что чаще всего выходят из строя двигатель – 39 %, а также детали КШМ – 16 %, в том числе ЦПГ – 8 %.

В связи с тем, что ДВС – наиболее дорогостоящий и наименее надежный агрегат автотранспортных средств, разработка мер повышения его надежности конструкторскими, технологическими и эксплуатационными методами является, несомненно, актуальным вопросом.

Анализ существующих методов повышения долговечности деталей ЦПГ ДВС позволил остановиться на их эксплуатационной группе как наиболее приемлемой и экономически оправданной.

Известно, что надежность современных автотранспортных двигателей в первую очередь зависит от качества применяемого масла. Качество масла и конструкция двигателя взаимосвязаны. Масло по существу является конструктивным элементом двигателя, определяющим его работоспособность.

Для достижения запланированных технико-экономических показателей автотранспортных двигателей, наряду с решением технологических и конструкторских задач, необходимо улучшать эксплуатационные свойства моторных масел с помощью различных присадок и добавок ним.

В последнее время все более широкое распространение находят добавки, содержащие порошки чистых металлов их сплавов, а также имеющие различные концентрацию и размеры частиц. Так, для повышения противоизносных, антифрикционных и противозадирных свойств смазочных материалов применяют такие металлы и их сплавы, как медь, олово, цинк, алюминий, никель, кобальт, серебро, кадмий, бронза, латунь, графит, молибден и многие другие.

Анализируя имеющиеся в литературе данные, можно отметить, что выпускаемые присадки и добавки к моторным маслам не в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемыми предприятиями, эксплуатирующими автотранспортные средства.

Ужесточение условий работы масел в современных теплонапряженных двигателях вызывает необходимость создания новых высокоэффективных

присадок, добавок и их композиций.

Несмотря на большое количество исследований в этой области, механизм влияния различных присадок и добавок, режимов работы и других факторов на трибологические свойства масел изучен недостаточно.

Актуальность работы подтверждается тем, что она была выполнена в соответствии с основными положениями «Стратегии развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2030 года», а также научно-технической программой «Обеспечение ресурсосбережения путем повышения надежности сельскохозяйственной техники и снижения энергозатрат в процессе ее эксплуатации» научного направления ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» (ныне – ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова») «Модернизация инженерно-технического обеспечения АПК» (рег. № 01201151795) в соответствии с темой «Проведение научных исследований по повышению надежности и эффективности использования мобильной техники в сельском хозяйстве» приоритетного направления развития «Модернизация инженерно-технического обеспечения АПК».

Степень разработанности темы. Изучению явлений, происходящих в зоне трения деталей машин, и разработке функциональных присадок и добавок к моторным маслам посвящены работы таких ученых, как А. С. Ахматов, П. А. Боуден, С. В. Венцель, И. Э. Виноградов, А. Б. Виппер, Я. Н. Войнович, А. А. Гуреев, Б. В. Дерягин, Ю. С. Заславский, Б. И. Костецкий, И. В. Крагельский, С. Э. Крейн, А. С. Кужаров, А. М. Кулиев, Б. Н. Лосиков, Р. М. Матвеевский, К. К. Папок, Н. Г. Пучков, П. А. Ребиндер, П. И. Санин, Е. Г. Семинидо, Ф. Г. Сулейманов, Д. Н. Тейбор, Г. И. Фукс, А. В. Чичинадзе и многих других.

Существенный вклад в изучение действия различных трибопрепаратов для повышения эксплуатационных показателей двигателей автотранспортной техники внесли следующие ученые: В. И. Балабанов, Д. Н. Гаркунов, В. П. Лялякин, П. И. Носихин, А. К. Ольховацкий, В. В. Остриков, В. В. Сафонов, В. В. Стрельцов, А. Л. Хохлов, В. И. Цыпцын, В. И. Черноиванов, А. Ю. Шабанов, Г. П. Шаронов и др.

Однако анализ литературных данных показал, что механизм действия смазочных сред, содержащих порошкообразные компоненты, полностью не изучен, многие положения и взгляды на этот вопрос остаются спорными. В связи с этим исследования, направленные на разработку новых эффективных составов трибопрепаратов на основе ультра- и наноразмерных порошкообразных компонентов для повышения межремонтного ресурса двигателей автотранспортной техники, и изучение процессов, происходящих в зоне контакта трущихся деталей, представляют значительный теоретический и практический интерес.

Цель работы – повышение долговечности двигателей автотранспортных средств за счет применения ремонтно-эксплуатационных добавок к моторному маслу при техническом обслуживании.

Задачи исследования:

1. На основании анализа литературных данных определить основные факторы, влияющие на снижение надежности автотранспортных двигателей.

2. Построить математическую модель процесса изнашивания трущихся поверхностей и установить влияние ремонтно-эксплуатационной добавки к смазочной среде на скорость изнашивания контактирующих деталей.

3. Обосновать состав и оптимальную концентрацию ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу для автотранспортных двигателей на основе ультра- и наноразмерных порошкообразных материалов.

4. Провести лабораторные трибологические испытания предлагаемой добавки к моторному маслу и исследовать морфологию поверхности трения, состав и физико-химические свойства поверхностной пленки. Обосновать механизм влияния порошкообразных добавок к моторному маслу на процесс формирования поверхностного слоя трущихся деталей.

5. Провести стендовые и эксплуатационные испытания разработанной смазочной композиции, дать технико-экономическую оценку эффективности применения ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу.

Объект исследования – технологические и динамические процессы, происходящие в двигателях машин под действием ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу.

Предмет исследования – закономерности изменений, происходящих в зоне контакта трущихся деталей машин в присутствии смазочной композиции, состоящей из моторного масла и ультра-, наноразмерной порошкообразной добавки.

Научную новизну работы представляют:

- математическая модель процесса изнашивания трущихся деталей, учитывающая изменение параметров состояния их поверхностных слоев под действием различных смазочных композиций;
- закономерности влияния ремонтно-эксплуатационной добавки к смазочной среде на скорость изнашивания контактирующих деталей, способствующей увеличению их ресурса;
- оптимальный состав ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу на основе ультра- и наноразмерных порошкообразных компонентов;
- результаты исследования влияния добавки к моторному маслу предлагаемого состава на трибологические и восстановительные свойства базового моторного масла;
- исследования морфологии поверхности трения, сформированной под влиянием предлагаемой смазочной композиции, а также состава поверхностного слоя и восстановительного эффекта ремонтно-эксплуатационной добавки;
- результаты сравнительных стендовых и эксплуатационных испытаний разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки к базовому моторному маслу.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в разработке математической модели процесса изнашивания трущихся деталей, учитывающей изменение параметров состояния их поверхностных слоев под действием различных смазочных композиций, в установлении вли-

яния добавки к смазочной среде на скорость изнашивания контактирующих деталей, способствующей увеличению их ресурса;

- в обосновании оптимального состава и концентрации ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу, содержащей ультра- и наноразмерные порошкообразные компоненты;
- в результатах применения разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу, позволяющей значительно уменьшить износ трущихся деталей и произвести восстановление их поверхностных дефектов, что приведет к увеличению межремонтного ресурса автотранспортных двигателей.

Результаты экспериментальных исследований применяются в учебном процессе при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий при изучении дисциплин «Триботехника», «Эксплуатационные материалы», «Технология ремонта тракторов и автомобилей» и др.

Результаты работы внедрены на предприятиях Саратовской области: ООО «Агрофирма “Рубеж”», ООО «Авторемонт», АО «Декабрист», ООО «ТВС – Агротехника», ООО «Мировая техника». Они также могут быть использованы на предприятиях, занимающихся эксплуатацией автотранспортной техники.

Методология и методы исследований. Методология исследований построена на основных принципах теории изнашивания трущихся деталей машин, условия адекватности исследовательских подходов и средств, позволяющих получить истинные знания об объекте, его физико-механических свойствах.

Основные методы исследований – эмпирические (наблюдение, сравнение, счет, измерение), математический анализ, экспериментально-теоретические, методы планирования экспериментов, статистические методы обработки данных, анализ, синтез и обобщение полученных результатов. Методика проведения исследований включала в себя лабораторные, стендовые и эксплуатационные испытания. Исследования проводили согласно рекомендациям соответствующих ГОСТов.

Экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики.

Производственные испытания проводили на автомобильной технике, эксплуатируемой на сельскохозяйственных предприятиях Саратовской области.

Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

- математическая модель процесса изнашивания трущихся деталей, учитывающая изменение параметров состояния их поверхностных слоев под действием различных смазочных композиций, а также влияние ремонтно-эксплуатационной добавки к смазочной среде на интенсивность изнашивания контактирующих деталей, способствующей увеличению их ресурса;
- обоснование состава и оптимальной концентрации ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу на основе ультра- и наноразмерных порошкообразных компонентов;
- результаты исследования влияния разработанной добавки к моторному маслу на трибологические и восстановительные свойства базового моторного масла;
- результаты исследования морфологии, химического состава поверхностных слоев, сформированных под действием исследуемых смазочных

композиций, а также восстановительного эффекта разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки;

- результаты сравнительных стендовых и эксплуатационных испытаний разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки к базовому моторному маслу и оценка экономической эффективности ее применения.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечены применением сертифицированных приборов и высокоточной измерительной аппаратуры, стандартных методик исследований, обработкой экспериментальных данных методами математической статистики, высокой сходимостью теоретических и экспериментальных данных.

Основные положения и результаты исследований были доложены, обсуждены и одобрены на научно-практических конференциях ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова» (Саратов, 2008–2022 гг.); на 15-й Международной научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика» (Санкт-Петербург, 2013 г.); на XII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК» в рамках XVIII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал – 2016» (Ставрополь, 2016 г.); на Международной научно-технической конференции «Проблемы экономичности и эксплуатации автотранспортной техники» (Саратов, 2017, 2021, 2022 гг.); на Международной научно-практической конференции, посвящённой 20-летию создания ассоциации «Аграрное образование и наука» (Саратов, 2018 г.); на I Национальной научно-практической конференции с международным участием «Инновации природообустройства и защиты окружающей среды» (Саратов, 2019 г.); на Международной научно-практической конференции, посвященной 40-летию ФГБНУ ВНИИТиН (Тамбов, 2020 г.).

Публикации по теме диссертации и личный вклад автора. По теме диссертации опубликовано 25 работ, из них 10 статей в рецензируемых научных изданиях по перечню ВАК РФ, 2 статьи в изданиях, включенных в международные базы Web of Science и Scopus, 3 патента РФ на изобретение. Общий объем публикаций составляет 5,26 печ. л., из которых 3,42 печ. л. принадлежит лично соискателю.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 169 страницах компьютерного текста, содержит 17 таблиц, 65 рисунков и 14 приложений. Список литературы включает в себя 169 наименований, из них 19 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, отражены степень ее разработанности, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Изложены методология и методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, сформулированы цель и задачи исследования.

В **первой главе «Состояние вопроса, цель и задачи исследования»** на основании обзора литературных источников установлено, что в агропромышлен-

ном комплексе в наиболее напряженные периоды сельскохозяйственных работ занято до 35 % всего подвижного состава автомобильного транспорта РФ, из которых более половины составляют автомобили семейства КАМАЗ.

Эффективность работы автомобилей в первую очередь определяется их надежностью.

Анализ неисправностей по системам и агрегатам, возникающих в процессе эксплуатации автомобилей семейства КАМАЗ, показал, что чаще всего выходит из строя двигатель – на его долю приходится 39 % неисправностей.

Доля отказов элементов двигателей КАМАЗ-740 (это детали цилиндропоршневой группы и коленчатый вал с вкладышами) составляет 16 %, а доля затрат на запасные части и эксплуатацию двигателей – 75,0 и 68,9 % соответственно.

В особо тяжелых условиях работает цилиндропоршневая группа (ЦПГ). Ее детали выполняют наиболее ответственные функции в рабочем процессе двигателя.

Анализ существующих методов повышения долговечности ЦПГ ДВС позволил остановиться на эксплуатационной группе как наиболее приемлемой и экономически оправданной.

Одним из вариантов сохранения работоспособности двигателей и других элементов автомобиля КАМАЗ в соответствии с техническими требованиями на протяжении всего межремонтного периода является повышение эффективности проведения операций технического сервиса за счет применения современных экспресс-технологий, способствующих снижению скорости изнашивания трущихся деталей и частичному или полному восстановлению зазоров между ними в процессе эксплуатации.

Надежность современных автотранспортных двигателей зависит в первую очередь от качества моторного масла, которое представляет собой сложную смесь углеводородов, их производных и различных добавок.

Анализ позволил выделить наноразмерные добавки к смазочным материалам, полученные методом плазменной переконденсации сырья. Основные их компоненты – наноразмерные порошки цветных металлов и их сплавов, а также антифрикционные ультрадисперсные порошки полититаната калия, полученные методом химического синтеза.

Во второй главе *«Теоретические предпосылки снижения износа деталей машин под действием ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу»* на основании элементов теории вероятностей построена математическая модель процесса изнашивания шероховатых поверхностей деталей.

Эксплуатационные свойства автотранспортной техники в основном определяются контактным взаимодействием трущихся деталей.

Процесс контактирования деталей обусловлен геометрическими параметрами, характеризующими шероховатость, и физико-механическими свойствами сопрягаемых поверхностей.

Исследования явлений износа деталей машин, работающих в разных условиях, позволили установить, что вид износа и его интенсивность определяются тремя основными факторами: механическими воздействиями на поверхности трения, внешней средой и свойствами трущихся деталей.

В связи с этим математическое моделирование процесса контактирования трущихся деталей без смазки и, особенно, в ее присутствии является актуальным.

Рассмотрен процесс взаимодействия выступов шероховатости во время движения двух трущихся поверхностей деталей относительно друг друга при помощи математической модели.

Для геометрического представления процесса построены сопряженные поверхности, фронтальные разрезы которых представлены ограниченными частями плоскостей D_1 и D_2 , рассматриваемые в системе координат xOy (рисунок 1). D_1 и D_2 ограничены длиной базы и так называемой линией шероховатости. Выступы шероховатости при этом хаотично расположены по поверхностям деталей и описаны линией шероховатости.

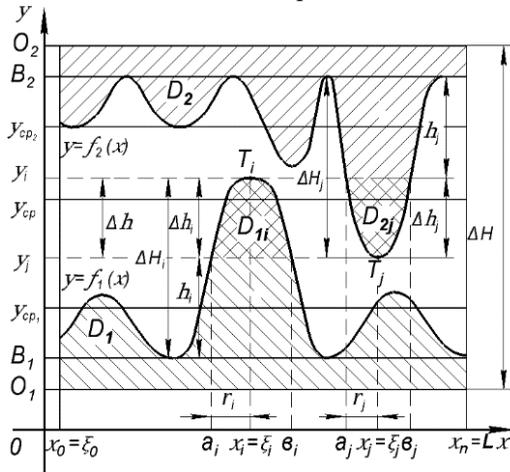


Рисунок 1 – Схема контакта трущихся поверхностей деталей на плоскости

Взаимодействие выступов шероховатости было рассмотрено на примере двух произвольно выбранных фрикционных выступов шероховатости с вершинами T_i , $i = \overline{1;n}$ и T_j , $j = \overline{1;r}$, принадлежащих взаимодействующим поверхностям деталей.

Графики $y = f_1(x)$ и $y = f_2(x)$ описали линии шероховатости для плоскостей D_1 и D_2 , представленных на плоскости xOy .

Наличие точек минимума и максимума T_i и T_j показало существование выступов шероховатости:

$$h_i = y_j - B_1; h_j = B_2 - y_i; \Delta h = \Delta h_i = \Delta h_j = y_i - y_j; \Delta H_i = y_i - B_1; \Delta H_j = B_2 - y_j, \quad (1)$$

где h_i , h_j – выступы шероховатости; y_i , y_j – координаты по оси Oy выступов шероховатости; ΔH_i , ΔH_j – максимальные высоты микровыступов трущихся поверхностей деталей.

Были рассмотрены условия срезания микровыступов.

В процессе перемещения трущихся поверхностей деталей относительно друг друга суммарная высота всех выступов шероховатости в процессе износа стремится к 0: $\Delta H \rightarrow 0$.

Для описания процесса изнашивания контактирующих поверхностей деталей с учетом задействования при трении новых вершин применяли элементы теории вероятностей.

Далее провели распределение случайных величин контакта микровыступов шероховатостей и определили закон их распределения. Рассмотрена связь интегральной и дифференциальной функций распределения случайных величин. Определена функция плотности распределения случайных величин. В результате установлены функциональная связь износа и значение функции плотности вероятностей распределения случайных величин.

Износ трущихся деталей был представлен в виде контактирования выступов в трехмерном пространстве (рисунок 2).

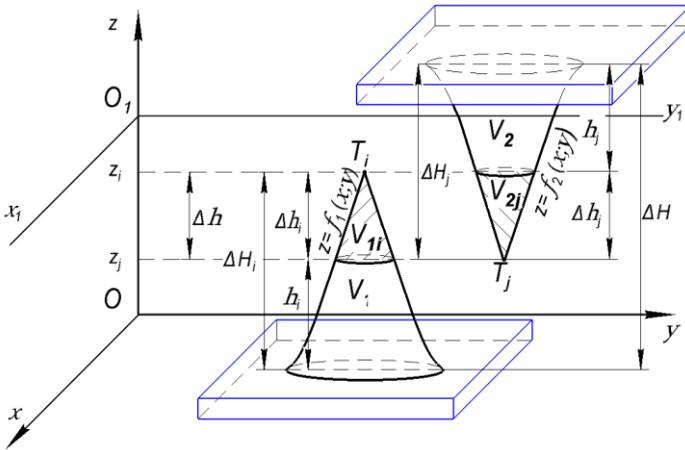


Рисунок 2 – Схема контакта взаимодействующих поверхностей деталей в трехмерном пространстве

Высоту частей выступов шероховатости, срезаемых в процессе износа, для трехмерного пространства определили по формуле:

$$\Delta h = z_i - z_j. \quad (2)$$

Функцию износа трущихся поверхностей деталей, зависящую от массы срезаемого материала m и от величины зазора между ними Δh представили следующим образом:

$$I = I(\Delta h; m). \quad (3)$$

В этом случае износ стало возможным ассоциировать с массой материала трущихся деталей, отделяемого в процессе относительного их перемещения, и с расстоянием Δh , изменяющимся в процессе их работы.

Потерянную в процессе износа суммарную массу для двух вершин шероховатости рассчитали по формуле:

$$m_{1,2_j} = \rho(V_{1_i} + V_{2_j}), \quad (4)$$

где $m_{1,2_j}$ – масса срезаемой части выступов шероховатости материала, кг.

Так как на протяженности базы $|x_0L|$ расположена совокупность вершин шероховатости $\bigcup_{i=1}^n A_i$ и $\bigcup_{j=1}^r A_j$ (см. рисунок 1), то формула, позволяющая подсчитать массу всех срезаемых вершин шероховатостей:

$$\sum_{i=1}^{n,r} m_{1,2_j} = \rho \sum_{i=1}^{n,r} \left(\iiint_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} dx dy dz + \iiint_{x_1, y_1, z_1}^{x_{j2}, y_{j2}, z_{j2}} dx dy dz \right). \quad (5)$$

Для сокращения написания формул вместо 2 деталей (i -й и j -й) рассматривали произвольно выбранный сегмент с обозначением k (рисунок 3).

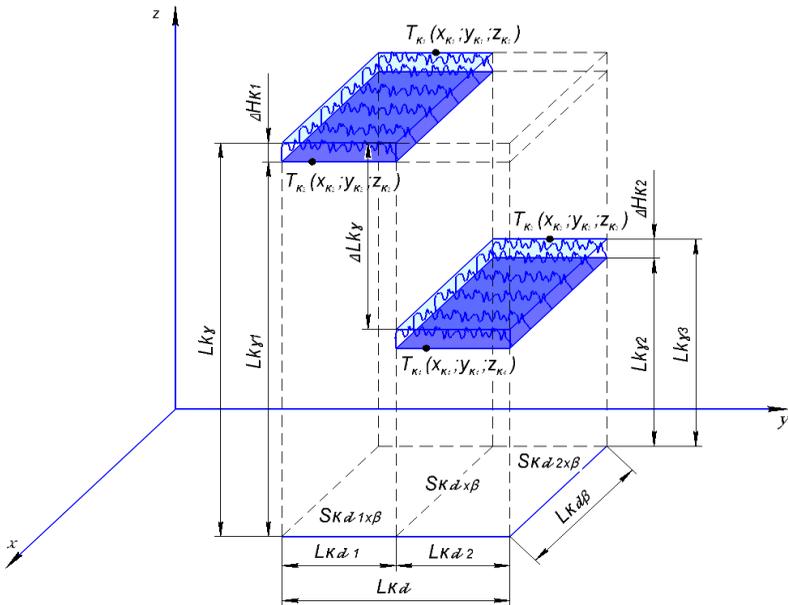


Рисунок 3 – Схема, демонстрирующая износ детали (модельного образца) после трибологических испытаний

Объём части детали до возникновения износа был рассчитан по формуле:

$$V_{ky} = L_{ka} L_{k\beta} L_{ky1} + \sum_{k=1}^n \iiint_{x_{k1}, y_{k1}, z_{k1}-\Delta H_{k1}}^{x_{k1}, y_{k1}, z_{k1}} dx dy dz. \quad (6)$$

Объем вершин шероховатости по всей площади $S_{k\alpha \times \beta}$:

$$V_{k\Delta H} = \sum_{k=1}^n \iiint_{x_{k1} y_{k1} z_{k1}}^{x_{k2} y_{k2} z_{k2}} dx dy dz. \quad (7)$$

Тогда массу исследуемой части детали до того, как произошел износ, можно определить по формуле:

$$M_{k\gamma} = \rho \left(L_{k\alpha} L_{k\beta} L_{k\gamma 1} + \sum_{k=1}^n \iiint_{x_{k1} y_{k1} z_{k1}}^{x_{k2} y_{k2} z_{k2}} dx dy dz \right). \quad (8)$$

В связи с тем, что первоначальная масса детали $M_{k\gamma}$ уменьшилась, то массу изношенной части детали на участке длиной $L_{k\alpha 1}$ за время t определяли по формуле:

$$M_{k\gamma 3} = M_{k\gamma} - \rho \left(L_{k\alpha} L_{k\beta} L_{k\gamma 1} + \sum_{k=1}^n \iiint_{x_{k1} y_{k1} z_{k1}}^{x_{k2} y_{k2} z_{k2}} dx dy dz + \right. \\ \left. + \left(S_{k\alpha 2 \times \beta} \Delta L_{k\gamma} + \sum_{k=1}^n \iiint_{x_{k3} y_{k3} z_{k3}}^{x_{k4} y_{k4} z_{k4}} dx dy dz \right) \right). \quad (9)$$

Разница масс ΔM части детали до и после эксперимента:

$$\Delta M = M_{k\gamma} - M_{k\gamma 3}. \quad (10)$$

Подсчитав разницу масс срезаемых частей образцов трения, определили износ детали по массе I :

$$I = I(\Delta M) = \rho \Delta V. \quad (11)$$

В свою очередь, скорость изнашивания $И$:

$$И = \frac{\rho V_{\Delta}}{t} = \frac{\rho \left(S_{k\alpha 2 \times \beta} \Delta L_{k\gamma} + \sum_{k=1}^n \iiint_{x_{k3} y_{k3} z_{k3}}^{x_{k4} y_{k4} z_{k4}} dx dy dz \right)}{t}. \quad (12)$$

Известно, что ресурс сопряжения деталей τ_{\max} :

$$\tau_{\max} = \tau_1 + \frac{I_{\max} - I_{\text{нач}}}{\text{tg } \alpha}, \quad (13)$$

где τ_1 — период приработки трущейся пары; I_{\max} — максимальный износ деталей; $I_{\text{нач}}$ — начальный износ; α — угол наклона кривой изнашивания деталей; $\text{tg } \alpha$ — показатель, характеризующий интенсивность изнашивания в период нормальной эксплуатации.

Поскольку I_{\max} — величина постоянная для конкретных деталей, то увеличения ресурса можно добиться за счет уменьшения $\text{tg } \alpha$.

Таким образом, разработка и применение при эксплуатации автотранспорт-

ной техники мероприятий, направленных на снижение интенсивности изнашивания деталей сопряжения, позволяют увеличить период эксплуатации.

В третьей главе «Программа и методика исследований» представлены программа и методики исследования физико-механических свойств поверхностных пленок, образованных при использовании ремонтно-эксплуатационной добавки (РЭД), а также программа и методики проведения лабораторных, стендовых и эксплуатационных испытаний.

Анализ существующих технологий получения наноразмерных порошков (НПП) металлов и их соединений позволил выделить метод плазменной переконденсации, основанный на испарении крупнодисперсного порошка или прутка необходимого металла (сырья) в плазменном потоке с температурой 6000–8000 К и конденсации пара до частиц требуемого размера.

Полученные частицы имеют форму, близкую к сферической, и характеризуются следующими параметрами: размер – 10...50 нм, удельная площадь поверхности – 100...150 м²/г.

В основу метода получения ультрадисперсных порошков (УДП) полититанатов калия положен синтез, основанный на взаимодействии порошка оксида титана с расплавами системы KNO₃-KOH (пат. РФ № 2493104).

Обоснование состава и оптимальной концентрации ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу проводили на основании анализа результатов сравнительных трибологических лабораторных испытаний, выполненных на машине трения СМЦ-2 по схеме «ролик – колодка», и с помощью метода полнофакторного планирования эксперимента.

Трибологические свойства разработанной смазочной композиции (моторное масло Лукойл 15W-40 + РЭД) сравнивали со свойствами базового моторного масла Лукойл 15W-40.

Шероховатость поверхности трения образцов определяли с помощью профилометра модели 130 степени точности I (ТУ 3943-001-70281271).

Морфологию полученных поверхностей трения и восстановительный эффект разработанной добавки к моторному маслу исследовали с помощью электронного микроскопа MIRA II TESCAN.

При оценке седиментационной устойчивости разработанной добавки к моторному маслу использовали ультразвуковую ванну ОЗУ-025 и жидкостный термостат ТЖ-ТС-01. В качестве ПАВ применяли техническую олеиновую кислоту Б-14 (ГОСТ 7580-91).

Химический элементный состав поверхностных пленок и заплавленных искусственных дефектов на трущихся деталях определяли с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа MIRA 2 LMU фирмы Tescan, оснащенного системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350.

Стендовые испытания двигателей КАМАЗ-7403.10-260, работающих на базовом моторном масле Лукойл 15W-40 и на предлагаемой смазочной композиции (смесь моторного масла Лукойл 15W-40 и разработанной добавки), проводили в соответствии с ГОСТ 14846-88.

Обкатку и испытания экспериментальных двигателей осуществляли на стенде фирмы AVL с гидротормозом фирмы SCHENCK. Испытательный

стенд укомплектован необходимым оборудованием и приборами, точность которых соответствует требованиям ГОСТ14846-88.

Исследования влияния ремонтно-эксплуатационной добавки на долговечность сопряжения «поршневое кольцо – гильза» в условиях эксплуатации проводили в АО «Декабрист» (Ершовский р-н, Саратовская обл.). Для этого использовали четыре автомобиля КАМАЗ 55-102, укомплектованных двигателями КАМАЗ 7403.10-260.

При обработке результатов эксплуатационных испытаний использовали методы математической статистики.

В четвертой главе «*Результаты экспериментальных исследований*» обоснован состав ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу и представлены результаты экспериментальных исследований влияния предлагаемой смазочной композиции на трибологические и восстановительные свойства базового моторного масла Лукойл 15W-40.

Состав и оптимальную концентрацию порошкообразных компонентов предлагаемой РЭД определяли с учетом результатов предварительных лабораторных испытаний и с помощью метода математического планирования эксперимента. В качестве параметра оптимизации был выбран износ образцов трения I .

В результате была получена математическая модель следующего вида:

$$y_p(I) = 27,6166 + 14,2889X_1 + 14,2084X_2 - 7,3287X_3 - 1,1231X_1X_2 - 1,8667X_1X_3 - 0,2821X_2X_3 - 1,15X_1^2 + 1,6187X_2^2 + 4,9542X_3^2, \quad (14)$$

где $y_p(I)$ – расчётное значение функции отклика; x_1 – содержание ультрадисперсного порошка (УДП) полититаната калия (ПТК); x_2 – содержание наноразмерного порошка (НРП) латуни; x_3 – содержание ПАВ.

Для получения смазочной композиции с наилучшими трибологическими свойствами выполнили оптимизацию её состава. Поскольку в качестве критерия оптимизации был выбран износ по массе, минимальное значение которого соответствует лучшим трибологическим свойствам смазочной композиции, то оптимизацию свели к нахождению значений факторов, соответствующих минимальному значению функции, заданной выражением (13). Для нахождения минимума функции $y_p(x_1, x_2, x_3)$, а также соответствующих ему значений факторов определили частные производные по этим факторам и приравняли их к нулю:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial y_p}{\partial x_1} &= 0; \\ \frac{\partial y_p}{\partial x_2} &= 0; \\ \frac{\partial y_p}{\partial x_3} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Решив систему уравнений (14), получили координаты экстремума – (1,08; 4,26; 0,85). Для наглядности уравнение регрессии представили графически в виде поверхности отклика (рисунок 4).

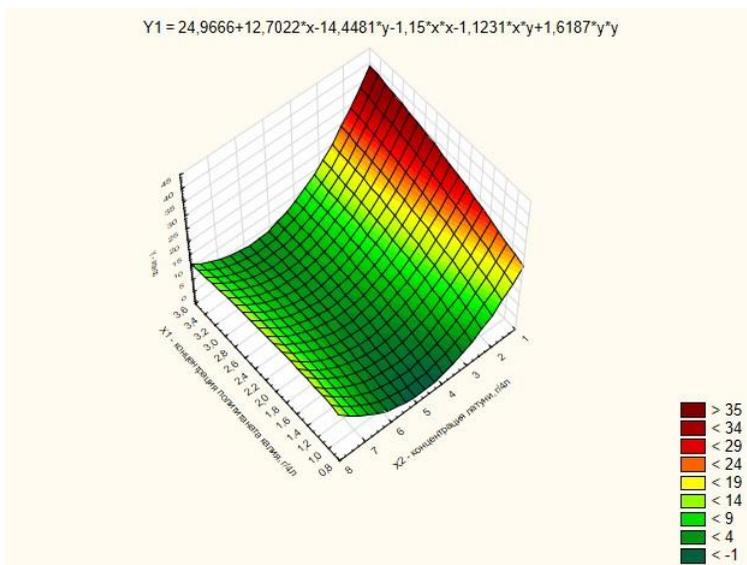


Рисунок 4 – График функции отклика

С помощью метода полного факторного эксперимента определена оптимальная концентрация компонентов добавки: ультраразмерный порошок поли-титаната калия – 0,27 г/л, наноразмерный порошок латуни – 1,07 г/л, ПАВ – 0,21 г/л. На разработанный состав смазочной композиции, названной «Кластер-В», получен патент Российской Федерации № 2525238.

Результаты исследования влияния разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки на трибологические и восстановительные свойства базового моторного масла показали ее эффективность: момент трения и температура в контакте элементов модельной пары трения уменьшились в 2,2 и 1,14 раза соответственно по сравнению с результатами испытаний базового масла Лукойл 15W-40. Кроме того, существенно улучшились противоизносные свойства базового моторного масла, а после 3 ч испытаний был обнаружен восстановительный эффект (рисунок 5).

Результаты сравнения теоретических данных износа и интенсивности изнашивания трущихся деталей с результатами эксперимента представлены в виде гистограммы и графика на рисунках 6 и 7.

Анализ данных, представленных на рисунках 6 и 7, показывает, что средний суммарный износ пар трения, испытанных на моторном масле Лукойл 15W-40, в среднем в 2,47 раз больше, чем у образцов, испытанных на масле Лукойл 15W-40 с разработанной РЭД, что согласуется с результатами теоретических исследований. Сходимость экспериментальных и теоретических данных износа трущихся деталей составила 88–92 %.

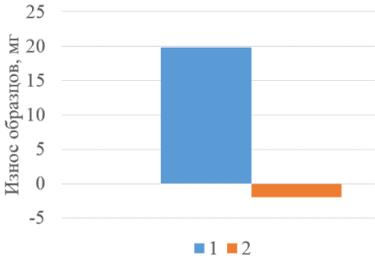


Рисунок 5 – Износ колодок, работавших на смазочных материалах:
1 – Лукойл 15W-40;
2 – Лукойл 15W-40 + РЭД

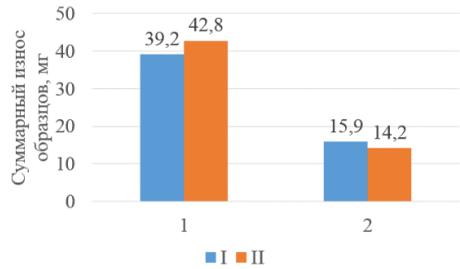


Рисунок 6 – Суммарный износ образцов трения, работавших на смазочных материалах: 1 – Лукойл 15W-40; 2 – Лукойл 15W-40 + РЭД; I – теоретические данные; II – экспериментальные данные

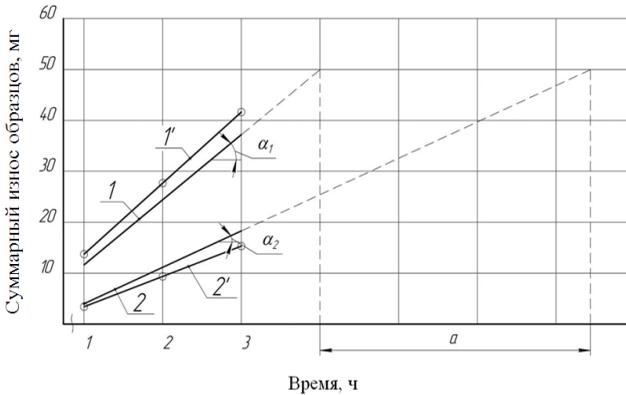


Рисунок 7 – Прогнозирование увеличения ресурса трущихся сопряжений, работавших на смазочных материалах: 1 – Лукойл 15W-40 (1' – по теоретическим данным; 2 – Лукойл 15W-40 + РЭД (2' – по экспериментальным данным)

Уменьшение величины износа трущихся деталей приведет к увеличению их ресурса. Это можно наглядно продемонстрировать при сравнении графиков износа двух деталей по времени, работающих с экспериментальными смазочными материалами и имеющими различные интенсивности изнашивания, характеризующиеся углом наклона α . Увеличение ресурса сопряжения составит величину a (см. рисунок 7).

При рассмотрении с помощью оптического микроскопа поверхности трения образцов, испытанных на базовом масле Лукойл 15W-40 с РЭД, хорошо видны участки новообразований (рисунок 8).

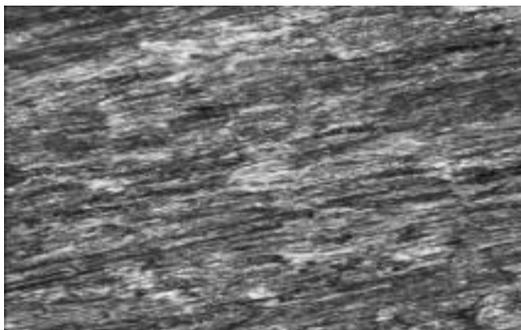


Рисунок 8 – Поверхность трения образца, испытанного на масле Лукойл 15W-40 + РЭД

Для исследования восстановительного эффекта разработанной добавки к моторному маслу был проведен эксперимент на машине трения СМЦ-2. На экспериментальных колодках пар трения были выполнены искусственные дефекты в виде отверстий диаметром 0,4 мм и глубиной 3 мм (рисунок 9).

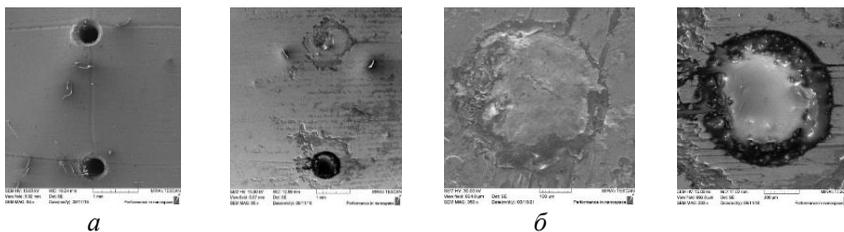


Рисунок 9 – Поверхностные дефекты образца трения: *а* – перед испытаниями; *б* – и восстановленные под воздействием добавки к моторному маслу

После 9 ч работы пары трения «ролик – колодка» происходило как бы «заплавление» поверхностных дефектов колодки.

В результате исследования содержания химических элементов на поверхности образца трения, испытанного на смазочной композиции, состоящей из смеси моторного масла Лукойл 15W-40 и разработанной РЭД, установлено, что наряду с основным химическим элементом железом (Fe), содержащимся в материале, из которого изготовлен образец, имеются также компоненты, присутствующие в смазочных материалах в качестве порошкообразных добавок, что указывает на их участие в формировании рабочих поверхностей образцов трения.

Анализ химических элементов, присутствующих в поверхностном слое образца, свидетельствует о неравномерном их распределении. В местах поверхностных дефектов их концентрации выше, чем других местах, а точках непосредственного контакта трущихся образцов их содержание минимально.

Механизм действия предлагаемой добавки основан на способности ультра- и наноразмерного порошка легированной латуни заполнять микровпади-

ны и микродефекты трущихся поверхностей, увеличивая тем самым фактическую площадь контакта. При попадании частиц в область фактического контакта трущихся тел происходит их взаимодействие с поверхностью трения, что приводит к образованию не сплошной и не однородной по толщине пленки, позволяющей заполнять за счет адгезии поверхностные дефекты и создавать гладкую поверхность трения.

За счет слоистой структуры компонента добавки полититаната калия сформирована пленка, которая характеризуется низким сопротивлением деформации сдвига, что вызывает снижение момента трения и температуры в паре «ролик – колодка», в отличие от моторного масла Лукойл 15W-40 без добавки.

Эффективность разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки оценивали также при проведении сравнительных стендовых испытаний экспериментальных двигателей КАМАЗ-7403.10. Критериями оценки служили величина износа основных деталей КШМ двигателей (гильзы цилиндров, поршневые кольца, шатунные и коренные вкладыши, шатунные и коренные шейки коленчатого вала, распределительный вал), а также степень влияния на основные технические характеристики двигателей (величина расхода картерных газов; удельный расход топлива, дымность отработавших газов и т. д.).

Стендовые испытания двигателей проводили в три этапа – приработка (50-мото-ч), основной этап (1000 мото-ч), дополнительный этап (250 мото-ч).

Результаты сравнительных стендовых испытаний экспериментальных двигателей на износ основных деталей КШМ доказали эффективность применения разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки. Ее использование привело к снижению износа в 1,21–2,3 раза.

Износ гильз цилиндров двигателей, работавших на масле Лукойл 15W-40 с разработанной добавкой, в среднем уменьшился в 1,36 раза по сравнению с двигателем, работавшим на базовом масле Лукойл 15W-40. В нижней части гильзы, начиная с 9-го и до последнего 12-го пояса наблюдался восстановительный эффект. В этих поясах размер гильз цилиндров уменьшился, а не увеличился, в отличие от гильз цилиндров дизелей, работавших на базовом масле Лукойл 15W-40 (рисунок 10).

Сравнительные эксплуатационные испытания автомобилей КАМАЗ 55-102, укомплектованных двигателями КАМАЗ 7403.10-260, показали, что прогнозируемое увеличение ресурса двигателей, работающих на моторном масле Лукойл 15W-40 с предлагаемой добавкой «Кластер-В», в среднем составит 55844 км пробега. Это в 1,82 раза больше по сравнению с двигателями, работающими на базовом моторном масле Лукойл 15W-40 (рисунок 11). С учетом предварительного пробега экспериментальных автомобилей полный ресурс двигателей, работающих на масле Лукойл 15W-40 с добавкой «Кластер-В», увеличится в среднем на 15 % по сравнению с полным ресурсом двигателей, работающих на базовом масле Лукойл 15W-40.



Рисунок 10 – Изменение величины износа гильз цилиндров по длине рабочей поверхности двигателей, испытанных: 1 – на моторном масле Лукойл 15W-40; 2 – Лукойл 15W-40 + РЭД

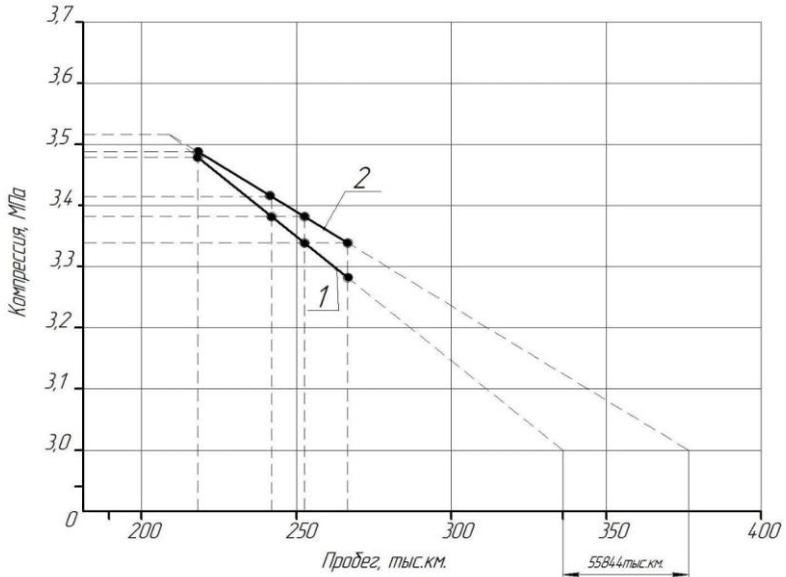


Рисунок 11 – Среднее значение остаточного ресурса сопряжения «поршневое кольцо – гильза» по результатам эксплуатационных испытаний двигателей КАМАЗ 7403.10, работавших: 1 – на масле Лукойл 15W-40; 2 – Лукойл 15W-40 + «Кластер-В»

В пятой главе «*Экономическая эффективность применения разработанной добавки к моторному маслу*» дана оценка экономической эффективности применения разработанной РЭД «Кластер-В».

Расчеты показали, что годовой экономический эффект от внедрения разработанной эксплуатационной добавки составит 5220 руб. на один двигатель КАМАЗ-7403.10. С учетом того, что, например, в Саратовской области в процессе производства сельскохозяйственной продукции используют примерно 10 тыс. автомобилей марки КАМАЗ с аналогичными двигателями, то годовой экономический эффект составит более 50 млн руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача, направленная на повышение эффективности технического сервиса автотранспортной техники путем применения ремонтно-эксплуатационной добавки к базовому моторному маслу с целью увеличения межремонтного ресурса двигателей.

1. Анализ литературных данных показал, что в агропромышленном комплексе в наиболее напряженные периоды сельскохозяйственных работ занято до 35 % всего подвижного состава автомобильного транспорта РФ, более половины которого составляют автомобили семейства КАМАЗ.

Доля отказов элементов двигателей КАМАЗ-740 (это детали цилиндропоршневой группы и коленчатый вал с вкладышами) составляет 16 %, а доля затрат на запасные части и эксплуатацию двигателей – 75,0 и 68,9 % соответственно среди других систем двигателя.

Сохранение работоспособности в соответствии с техническими требованиями на протяжении всего межремонтного ресурса двигателей и других элементов автомобиля КАМАЗ возможно путем повышения эффективности проведения операций технического сервиса с применением современных экспресс-технологий, способствующих снижению интенсивности изнашивания трущихся деталей и частичному или полному восстановлению зазоров между трущимися деталями агрегатов машин в процессе эксплуатации.

2. Построена математическая модель процесса изнашивания трущихся деталей (11), учитывающая изменение параметров состояния их поверхностных слоев под действием различных смазочных композиций. Установлено влияние ремонтно-эксплуатационной добавки к смазочной среде на интенсивность изнашивания контактирующих деталей, способствующей увеличению их ресурса, – формула (12).

Разработан состав ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу на основе ультра- и наноразмерных порошкообразных компонентов и методом математического планирования эксперимента установлена их оптимальная концентрация.

Методом полного факторного эксперимента определена оптимальная концентрация компонентов добавки: ультраразмерный порошок полититаната калия – 0,27 г/л, наноразмерный порошок латуни – 1,07 г/л, ПАВ – 0,21 г/л. На разработанный состав смазочной композиции, названной «Кластер-В», полу-

чен патент Российской Федерации № 2525238.

3. Результаты исследования влияния разработанной добавки к моторному маслу «Кластер-В» на трибологические и восстановительные свойства базового моторного масла доказали ее эффективность. Так, момент трения и температура в контакте элементов модельной пары трения уменьшились в 2,2 и 1,14 раза соответственно по сравнению с базовым маслом Лукойл 15W-40, существенно повысить противозносные свойства базового моторного масла, отмечено также восстановление поверхностных дефектов трущихся деталей.

При рассмотрении с помощью оптического микроскопа поверхности трения образцов, испытанных на базовом масле Лукойл 15W-40 с добавкой, хорошо видны участки новообразований. Характерно, что наблюдаемые участки пленки начинают формироваться в наиболее нагруженных местах поверхностей трения, вызванных повышенной шероховатостью, или в зонах поверхностных дефектов.

С помощью электронного микроскопа было установлено, что наряду с основным химическим элементом железом (Fe), содержащемся в материале, из которого изготовлен образец, имеются также компоненты порошкообразных добавок, применяемых в смазочных материалах, что указывает на участие этих добавок в формировании рабочих поверхностей образцов трения. В процессе трения компоненты добавки спрессовываются и за счет адгезии заполняют впадины между выступами шероховатости поверхности трения контактирующих деталей. Это приводит к уменьшению шероховатости поверхности трения, увеличению реальной площади контакта и, как следствие, к снижению фактических контактных давлений и восстановлению поверхностных дефектов трущихся деталей.

4. Результаты сравнительных стендовых испытаний экспериментальных двигателей на износ основных деталей КШМ также показали эффективность разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки «Кластер-В». Ее использование привело к снижению износа основных деталей КШМ двигателя КАМАЗ-7403.10 в 1,21–2,3 раза.

В ходе сравнительных эксплуатационных испытаний установлено, что прогнозируемое увеличение ресурса двигателей, работающих на моторном масле Лукойл 15W-40 с добавкой «Кластер-В», в среднем составит 55844 км пробега. Это в 1,82 раза больше, чем у двигателей, работающих на базовом моторном масле Лукойл 15W-40.

В результате исследований изменения физико-химических характеристик моторного масла с предлагаемой добавкой «Кластер-В» установлены повышение его эксплуатационных свойств, снижение содержания продуктов износа, что предопределяет возможность увеличения срока службы масла до замены.

5. Годовой технико-экономический эффект от внедрения разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки «Кластер-В» составит 5220 руб. на один двигатель КАМАЗ. С учетом того, что, например, в Саратовской области при производстве сельскохозяйственной продукции используют примерно 10 тыс. автомобилей марки КАМАЗ с аналогичными двигателями, то годовой экономический эффект составит более 50 млн руб.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

С целью значительного повышения межремонтного ресурса предприятиям, занимающимся эксплуатацией и техническим сервисом автотракторной техники, рекомендуется применять разработанную ремонтно-эксплуатационной добавку на основе ультра- и наноразмерных порошкообразных материалов при каждой замене моторного масла во время очередного технического обслуживания.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Направлениями дальнейших исследований по данной тематике могут быть:

- исследование влияния разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки, содержащей ультра- и наноразмерные порошкообразные материалы, на ресурс других агрегатов автотракторной техники, работающих в смазочной среде (трансмиссии, гидравлической системы и т. д.);
- расширение номенклатуры и комбинации ультра- и наноразмерных порошкообразных компонентов добавок к смазочным материалам с целью формирования поверхностных пленок трущихся деталей машин с требуемыми физико-механическими свойствами;
- модернизация составов порошкообразных добавок к смазочным материалам автотракторной техники для периодов приработки, установившейся эксплуатации и периода, приближенному к предельному состоянию;
- исследование влияния разработанных составов ультра- и наноразмерных порошкообразных добавок на изменение физико-химических свойств смазочных материалов и периодичность их замены при эксплуатации агрегатов мобильной автотракторной техники.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. *Остриков, В. В.* Расширение функциональных возможностей добавок к моторным маслам / В. В. Остриков, А. Г. Зимин, С. Ю. Попов, В. В. Сафонов, **К. В. Сафонов** // Техника в сельском хозяйстве. – 2012. – № 2. – С. 32–33.
2. *Добринский, Э. К.* Оптимизация нанодисперсной добавки в моторное масло / Э. К. Добринский, В. В. Сафонов, А. В. Гороховский, В. Н. Буйлов, А. С. Азаров, **К. В. Сафонов** // Вестник АПК Ставрополя. – 2014. – № 3 (15). – С. 12–16.
3. *Сафонов, К. В.* Увеличение жизненного цикла двигателя модификацией моторного масла наноразмерными порошкообразными компонентами / К. В. Сафонов, М. М. Соколов // Актуальные направления научных исследований XXI века : теория и практика. – 2015. – Т. 3. – № 8–2 (19–2). – С. 410–414.
4. *Сафонов, В. В.* Синтез и изучение свойств стабилизатора металлического порошка в смазочной композиции / В. В. Сафонов, В. В. Остриков, В. В. Венскайтис, **К. В. Сафонов**, А. С. Азаров // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29. – № 1. – С. 108–123.

5. Сафонов, В. В. Влияние ультразвука на седиментационную устойчивость нанодисперсного порошка в смазочной среде // В. В. Сафонов, В. В. Уткин, **К. В. Сафонов**, В. А. Мухин, Э. К. Добринский, В. В. Остриков // Наука в центральной России. – 2019. – № 6 (42). – С. 67–75.

6. **Сафонов, К. В.** Эксплуатационные испытания наноразмерной добавки «Кластер-В» к моторному маслу дизеля КАМАЗ-740 / К. В. Сафонов, В. В. Сафонов, В. В. Остриков, Ш. М. Игитов // Транспорт Урала. – 2021. – № 1 (68). – С. 56–60.

7. Сафонов, В. В. О влиянии нано- и высокодисперсных порошкообразных добавок на эксплуатационные свойства моторного масла / В. В. Сафонов, С. А. Шишуринов, В. В. Остриков, А. М. Захаревич, **К. В. Сафонов** // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 12. – С. 100–105.

8. Сафонов, В. В. Исследование влияния добавок на трибологические характеристики смазочного материала и морфологию поверхностей трения / В. В. Сафонов, С. А. Шишуринов, В. В. Венский, **К. В. Сафонов**, В. В. Остриков // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 1. – С. 88–92.

9. **Сафонов, К. В.** Перспективные рецептуры моторных масел с нанодисперсными добавками для двигателей внутреннего сгорания // К. В. Сафонов, В. В. Сафонов, В. В. Остриков, В. И. Оробинский, Д. Н. Афоничев // Химия и технология топлив и масел. – 2022. – № 1 (629). – С. 16–18.

В научных изданиях, включенных в базу данных Scopus

10. Safonov, V. V. Synthesis and Study of Properties of a Metal Powder Stabilizer in a Lubricant Composition / V. V. Safonov, V. V. Ostrikov, V. V. Venskaitis, **K. V. Safonov**, A. S. Azarov // Engineering Technologies and Systems. – 2019. – Vol. 29. – No. 1. – P. 108–123.

11. **Safonov, K. V.** Promising Formulations of Motor Oils with Nanodispersed Additives for Internal Combustion Engines / K. V. Safonov, V. V. Safonov, V. V. Ostrikov, V. I. Orobinsky, D. N. Afonichev // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2022. – Vol. 58. – No. 2. – С. 271–274.

В авторских свидетельствах и патентах

12. Пат. 2493104 Российская Федерация, МПК С10М 125/10. Порошок титаната калия и смазочная композиция на его основе / Гороховский А. В., Азаров А. С., Палагин А. И., Третьяченко Е. В., Сафонов В. В., **Сафонов К. В.**; заявитель и патентообладатель Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А. – № 2012103825/05; заявл. 03.02.2012; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26.

13. Пат. 2525238 Российская Федерация, МПК С10М 125/00. Смазочная композиция / Сафонов В. В., Добринский Э. К., Гороховский А. В., Буйлов В. Н., **Сафонов К. В.**, Галкин А. А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова». – № 2013116082/04; заявл. 09.04.2013; опубл. 10.08.2014, Бюл. № 22.

14. Пат. 2507243 Российская Федерация, МПК С10М125/00. Смазочная композиция / Остриков В. В., Сафонов В. В., Попов С. Ю., **Сафонов К. В.**, Зимин А. Г.; заявитель и патентообладатель ГНУ ВНИИТИН Россельхозакадемии. – № 2013101358/04; заявл. 10.01.2013; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5.

В сборниках научных трудов, материалах конференций и семинаров

15. Сафонов, В. В. Влияние наноструктурных материалов на трибологические свойства моторного масла / В. В. Сафонов, В. А. Александров, **К. В. Сафонов**, А. С.

Азаров // Трибология и надежность : матер. VII Междунар. науч. конф. / под общ. ред. К. Н. Войнова. – СПб., 2007. – С. 33–40.

16. *Остриков, В. В.* Расширение функциональных возможностей ремонтно-восстановительного состава / В. В. Остриков, С. Ю. Попов, В. В. Сафонов, **К. В. Сафонов** // Матер. 15 Междунар. науч.-практ. конф. «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта : теория и практика». – СПб., 2013. – Т. 2. – С. 214–218.

17. *Сафонов, В. В.* Разработка ремонтно-восстановительного трибосостава для моторного масла / В. В. Сафонов, А. С. Азаров, **К. В. Сафонов**, В. Н. Буйлов // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : матер. Междунар. науч.-техн. семинара им. В. В. Михайлова. – Саратов, 2014. – С. 165–168.

18. *Сафонов, В. В.* Моделирование тепловых процессов в зоне трения образцов деталей в присутствии смазки / В. В. Сафонов, М. М. Соколов, **К. В. Сафонов** // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК : матер. XII Междунар. науч.-практ. конф. в рамках XVIII Междунар. агропром. выставки «Агроуниверсал – 2016». – Ставрополь, 2016. – С. 245–250.

19. *Сафонов, В. В.* Результаты сравнительных испытаний добавок к моторным маслам «Кластер-В» и «Wagner» / В. В. Сафонов, А. В. Калужский, **К. В. Сафонов** // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : матер. 30 Междунар. науч.-техн. семинара им. В. В. Михайлова. – Саратов, 2017. – С. 7–12.

20. *Сафонов, В. В.* Разработка состава стабилизатора ультра-, наноразмерных порошков в смазочной среде / В. В. Сафонов, В. В. Венскаяйтис, **К. В. Сафонов** // Вклад ученых в повышение эффективности агропромышленного комплекса России : матер. Междунар. научн.-практ. конф., посвящ. 20-летию создания Ассоциации «Аграрное образование и наука». – Саратов, 2018. – С. 69–72.

21. *Сафонов, В. В.* О влиянии добавки «Кластер» на состояние дизеля и моторного масла / В. В. Сафонов, А. А. Железняков, **К. В. Сафонов**, С. А. Шишуриин // Инновации природообустройства и защиты окружающей среды : матер. I Национал. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Саратов, 2019. – С. 585–588.

22. *Сафонов, К. В.* Определение оптимального состава нанокomпозиционной добавки к моторному маслу / К. В. Сафонов // Проблемы и перспективы инновационного развития АПК : матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 40-летию ФГБНУ ВНИИТиН. – Тамбов, 2020. – С. 183–188.

23. *Сафонов, В. В.* Сравнительная оценка трибологических свойств нанодобавок к материалам, принадлежащим к классу реметализантов и ревитализантов / В. В. Сафонов, В. В. Венскаяйтис, А. И. Фатькин, А. С. Чумаков, Е. А. Соколов, **К. В. Сафонов** // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : матер. XXXIV Междунар. науч.-техн. семинара им. В. В. Михайлова. – Саратов, 2021. – С. 132–137.

24. *Сафонов, В. В.* Изменение трибологических свойств смазочных материалов под действием нанодобавок / В. В. Сафонов, В. В. Венскаяйтис, А. И. Фатькин, А. С. Чумаков, Е. А. Соколов, **К. В. Сафонов** // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : матер. XXXIV Междунар. науч.-техн. семинара им. В. В. Михайлова. – Саратов, 2021. – С. 138–142.

25. *Сафонов, В. В.* Влияние твердофазных добавок к моторному маслу на твердость трущихся поверхностей деталей / В. В. Сафонов, С. А. Шишуриин, С. В. Чумакова, **К. В. Сафонов**, Е. А. Соколов // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : матер. XXXV Междунар. науч.-техн. семинара им. В. В. Михайлова. – Саратов, 2022. – С. 206–211.

Подписано в печать
Печ. л. 1,0

Формат 60×84 1/16
Тираж 100
