

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Саратовский государственный университет
генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова»**

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, доцент
Шишурин С. А.

Саратов 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1 Анализ условий работы двигателей и износа деталей в автотранспортной технике	11
1.2 Анализ характеристик моторных масел, используемых в двигателях автотранспортных средств	21
1.3 Обзор современных металлосодержащих присадок и добавок к моторным маслам для улучшения их эксплуатационных свойств и снижения износа деталей	28
1.4 Выводы по главе	37
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СНИЖЕНИЯ ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОД ДЕЙСТВИЕМ РЕМОНТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОБАВКИ К МОТОРНЫМ МАСЛАМ	39
2.1 Математическая модель процесса изнашивания трущихся поверхностей деталей машин	39
2.2 Обоснование состава ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу	62
2.3 Оценка влияния предлагаемой смазочной композиции на ресурс трибосопряжения.....	71
2.4 Выводы по главе	72
3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ	74
3.1 Общая программа исследований	74
3.2. Общие методические подходы к получению ультра- и наноразмерных порошкообразных металлов	75
3.3 Методика получения ультрадисперсных порошков полититаната калия	77
3.4 Методика приготовления смазочной композиции с использованием ультра- и наноразмерных компонентов	80
3.5 Методика трибологических испытаний добавок к моторному маслу	82
3.6 Методика исследования морфологии поверхностей трения образцов и химического состава поверхностной пленки	85
3.7 Исследование седиментационной устойчивости смазочной композиции	86
3.8 Методика проведения стендовых испытаний состава смазочной композиции в ДВС	90
3.9 Методика проведения эксплуатационных испытаний	94
3.10 Методика оценки изменения физико-химических характеристик моторных масел под действием порошкообразных добавок	97

3.11 Методика обработки экспериментальных данных и оценки точности измерений	98
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	101
4.1 Обоснование состава ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу	101
4.2 Результаты сравнительных трибологических исследований предлагаемой смазочной композиции и базового моторного масла	104
4.3 Результаты исследований седиментационной устойчивости состава добавки на основе ультра- и наноразмерных порошков	107
4.4 Оценочные результаты теоретических исследований	109
4.5 Результаты исследования морфологии поверхностей трения	116
4.6 Результаты определения восстановительного эффекта ремонтно-эксплуатационной добавки к маслу	119
4.7 Результаты сравнительных стендовых испытаний смазочной композиции в двигателе КАМАЗ-7403.10	124
4.8 Результаты эксплуатационных испытаний двигателей КАМАЗ 7403.10 с экспериментальными смазочными композициями	132
4.9 Результаты исследований изменения свойств моторных масел под действием ремонтно-эксплуатационной добавки	134
4.10 Выводы по главе	142
5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ ДОБАВКИ К МОТОРНОМУ МАСЛУ	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	148
РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ	150
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ	149
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	152
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	153
ПРИЛОЖЕНИЯ	170

ВВЕДЕНИЕ

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.

За межремонтный ресурс грузового автомобиля затраты на поддержание его в работоспособном состоянии 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 дорогостоящие и наименее надежные агрегаты автотранспортной техники, разработка мер повышения их надежности конструкторскими, технологическими и эксплуатационными методами является, несомненно, актуальным вопросом.

Анализ существующих методов повышения долговечности 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» [135].

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» [129].

Анализируя имеющиеся в литературе данные, можно отметить, что выпускаемые присадки и добавки к моторным маслам не в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым транспортными предприятиями.

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. Вен-

цель, 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, 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-эксплуатационной добавки к моторному маслу при техническом обслуживании.

Задачи исследования:

1. На основании анализа литературных данных определить основные факторы, влияющие на снижение надежности двигателей автотранспортных средств.
2. Построить математическую модель процесса изнашивания трущихся поверхностей и установить влияние предлагаемой ремонтно-эксплуатационной добавки к смазочной среде на скорость изнашивания контактирующих деталей.
3. Обосновать состав и оптимальную концентрацию ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу двигателей автотранспортных средств 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, способствующий образованию износостойкой пленки на поверхности трения деталей;

- 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, и обосновании влияния 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 «Авторемонт», ООО «Агрофирма «Рубеж»», АО «Декабрист», ООО «ТВС – Агротехника», ООО «Мировая техника». Они также могут быть использованы на предприятиях, занимающихся эксплуатацией автотранспортных средств.

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 скорость 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.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ условий работы двигателей и износа деталей в автотранспортной технике

Большую часть сельскохозяйственных грузов перевозят автомобильным транспортом. Это связано в первую очередь с большими территориями возделывания сельскохозяйственных культур, а также приемлемой себестоимостью перевозимых грузов.

В агропромышленном комплексе в наиболее напряженные периоды сельскохозяйственных работ занято до 35 % всего подвижного состава автомобильного транспорта РФ, из которых более половины составляют автомобили семейства КАМАЗ. Они имеют достаточную грузоподъемность, обладают повышенной проходимостью, высокоманевренны.

Эффективность работы автомобилей зависит от их основных показателей, таких, как безотказность, долговечность, мощность и экономичность. Однако опыт эксплуатации автомобильного парка РФ свидетельствует о том, что их значительная часть эксплуатируется с нарушениями требований к техническому состоянию, что ведет к снижению их надежности [23, 78, 141].

На крупных и средних автотранспортных предприятиях парк эксплуатируемых грузовых автомобилей имеет не более 14 % единиц техники, срок службы которых не превышает 5 лет, а около 70 % единиц имеют срок службы более 10 лет [17].

Решение данной проблемы с одной стороны обеспечивается за счет выпуска новых наиболее надежных машин, а с другой – совершенствованием методов технической эксплуатации и технического обслуживания.

В настоящее время большинство предприятий не имеют средств на систематическое обновление парка техники и проведение своевременного и качественного технического сервиса. Это обуславливает заинтересованность технических служб предприятий в современных методах ремонта и технического обслуживания агрегатов машин, способных обеспечить высокое качество ТС по приемлемой стоимости и с незначительными простоями [6]. В связи с этим можно утверждать,

что повышение эксплуатационной надежности транспортных средств возможно обеспечить за счет своевременного и качественного проведением операций ТО и ремонта с использованием инновационных технологий.

Доля затрат на технический сервис в себестоимости автомобильных перевозок составляет 12–15 %.

В мобильных транспортных средствах, особенно большой грузоподъемности (например, в автомобиле КАМАЗ), одним из важнейших устройств, влияющих на надежность их работы, является двигатель.

К техническому состоянию двигателя предъявляют особые требования [6–8, 70, 72, 158, 159], гарантирующие надежную работу автомобиля в целом.

Анализ неисправностей по системам и агрегатам, возникающих в процессе эксплуатации автомобилей семейства КАМАЗ (на примере КАМАЗ-55111), показывает, что чаще всего выходит из строя двигатель – 39 % [23] (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Диаграмма отказов систем и агрегатов автомобилей КАМАЗ-55111

Согласно данным, на цилиндропоршневую группу (ЦПГ) двигателей КАМАЗ-740.11-240 приходится 8 % отказов [72, 80], а на запасные части и эксплуатацию двигателей – 75 и 68,9 % соответственно (рисунки 1.2 и 1.3, таблица 1.1).

Распределение отказов по элементам двигателя КАМАЗ-740.11-240

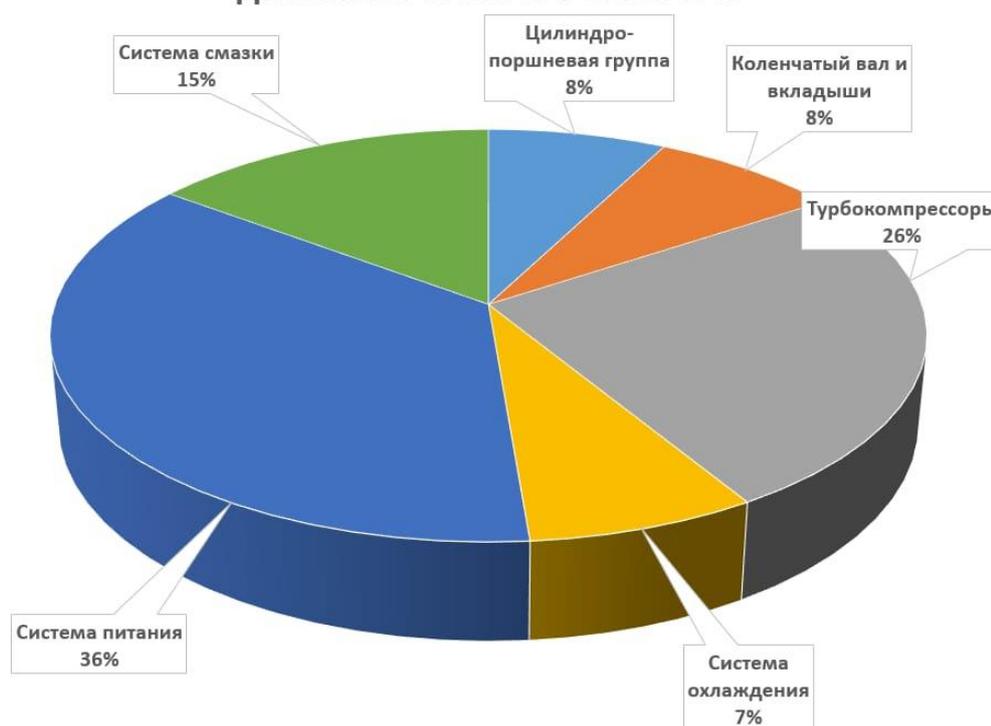


Рисунок 1.2 – Диаграмма отказов по элементам двигателей КАМАЗ 740.11-240

Распределение затрат на запасные части при ремонте двигателя КАМАЗ-740.11-240

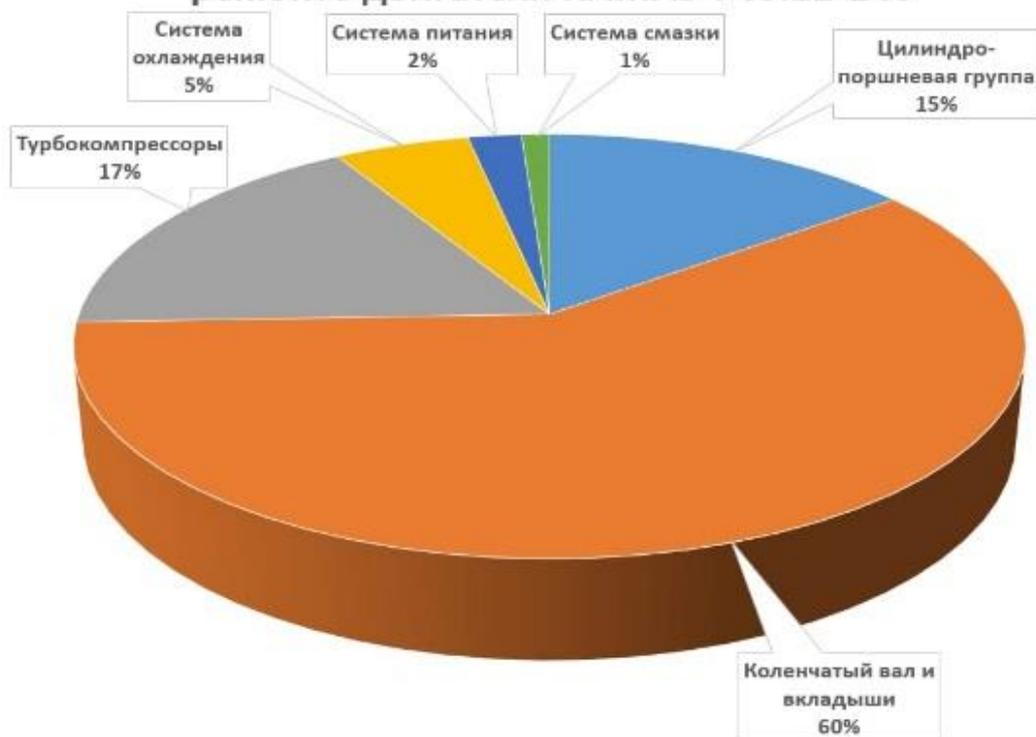


Рисунок 1.3 – Диаграмма распределения затрат на запасные части при ремонте двигателя КАМАЗ 740.11-240

Таблица 1.1 – Отказы и затраты на ремонт двигателей КАМАЗ-740.11-240

Наименование элементов	Доля отказов, %	Затраты, %	
		на запчасти	трудовые
1. Цилиндропоршневая группа	7,6	14,7	14,2
2. Коленчатый вал и вкладыши	8,1	59,7	54,7
3. Турбокомпрессоры	25,6	17,1	2,4
4. Система охлаждения	7,4	5,3	9,3
5. Система питания	36,2	2,1	11,5
6. Система смазки	14,8	1,1	7,9

В связи с этим можно отметить, что на отказы двигателей значительное влияние оказывает состояние КШМ (ЦПГ и коленчатый вал с вкладышами).

К двигателям внутреннего сгорания в последнее время предъявляют всё более жёсткие требования, связанные с увеличением удельной и литровой мощности, снижением металлоёмкости, повышением экономичности и экологической безопасности. Все эти требования, несомненно, отразятся на цилиндропоршневой группе, поскольку она является определяющей в работоспособности ДВС. Кроме того, детали ЦПГ (гильза цилиндра, поршень и поршневые кольца) в процессе эксплуатации подвергаются наибольшему износу в связи с наиболее жесткими условиями работы. Таким образом, задача повышения износостойкости данных деталей является первоочередной и наиболее важной.

Основная нагрузка при эксплуатации автомобиля приходится на двигатель. Поскольку ДВС являются наиболее дорогостоящими и наименее надежными агрегатами автотранспортной техники, то разработка технических решений, направленных на повышение их надежности конструкторскими, технологическими и эксплуатационными методами будет, несомненно, актуальной.

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

Одним из вариантов обеспечения работоспособности двигателей и других элементов автомобиля КАМАЗ, в соответствии с техническими требованиями на протяжении всего межремонтного ресурса, является повышение эффективности 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 [8, 10, 18, 21, 53, 60, 76, 77, 151, 157].

Наиболее ответственными деталями, влияющими на ресурс двигателей, являются детали цилиндропоршневой группы:

- гильзы цилиндров;
- поршень с поршневыми кольцами.

«Эти детали работают в наиболее тяжелых условиях под действием высоких давлений газов, сил инерции и температуры. Максимальное давление в дизелях автотранспортного назначения достигает 12...14 МПа, а максимальные температуры в процессе сгорания топлива – около 2500 К» [129].

Неисправности двигателя чаще всего возникают вследствие нарушения тепловых и нагрузочных режимов работы, герметичности внутренних полостей, а также по причине использования некачественных сортов топлива и смазочных масел.

«Детали ЦПГ выполняют наиболее ответственные функции в рабочем процессе двигателя. Так, поршневые кольца и гильзы цилиндров должны создавать достаточно герметичное рабочее пространство цилиндра, интенсивно отводить теплоту от поршней в систему охлаждения, а маслосъемные кольца обеспечивать образование равномерной масляной пленки на трущихся поверхностях и не допускать попадания масла в камеры сгорания» [80].

Влияние максимального давления на интенсивность износа деталей ЦПГ было исследовано в работе [71]. Результаты показали, что повышение максимального давления на 67 % ведет к повышению скорости изнашивания поршневых колец на 35–40 %, что в итоге приводит к нарушению работоспособности двигателя и простоям для выполнения ремонтных операций со значительными затратами на запасные части и проведения трудозатратных разборочно-сборочных работ.

Гильзы цилиндров автотранспортных двигателей, изготовленные из специального чугуна, обычно подвергают закалке или химико-термической обработке. В поперечном сечении оси новая гильза имеет форму правильной окружности, в продольном – правильного прямоугольника. Естественный износ гильз цилиндров

происходит в области движения поршневых колец. Гильза, изнашиваясь, в поперечном сечении оси начинает приобретать форму овала, а в продольном – форму конуса [42, 43, 69, 71].

В процессе эксплуатации двигателей наиболее интенсивно изнашиваются детали ЦПГ. Износ гильзы цилиндров в основном происходит в верхней части при движении поршня вблизи верхней мёртвой точки. Значительный износ также наблюдается у верхнего компрессионного кольца за счет воздействия твердых абразивных частиц, поступающих в цилиндры двигателя по воздушному каналу, а также за счет ухудшения или полного нарушения гидродинамического режима смазки в паре трения «гильза – компрессионное кольцо» в верхней части хода поршня. Этот негативный эффект возникает вследствие уменьшения скорости относительного перемещения этих деталей. Кроме того, высокую скорость изнашивания деталей ЦПГ обеспечивают температура и давление газов в закольцевом пространстве канавки верхнего компрессионного кольца.

Детали ЦПГ в силу конструктивных особенностей автотракторных двигателей обычно смазываются за счет разбрызгивания масла, вытекающего из шатунных и коренных подшипников коленчатого вала. При этом образуется так называемый «масляный туман». В паре трения «гильза – компрессионное кольцо» возможно создание гидродинамического режима смазывания только в средней части хода поршня. Вблизи нижней и верхней мертвых точек данный режим смазки невозможен из-за низкой скорости перемещения контактирующих деталей. У деталей ЦПГ определяющим является абразивный износ, обусловленный давлением компрессионных колец на стенки гильз цилиндров, концентрацией и размером абразива, а также свойствами материалов трущихся деталей.

Под действием процессов, происходящих в период работы двигателей, их техническое состояние интенсивно изменяется [29, 80].

Неравномерность износа по образующей обусловлена более сильным изнашивающим действием верхнего поршневого кольца вследствие повышенного давления его на стенки цилиндра, вызванного давлением газов. Кроме того, из-за высокой температуры газов в камере сгорания вязкость масла в пленке, покрыва-

ющей верхнюю часть цилиндра, резко падает, пленка становится более подвижной, сдувается газами, прорывающимися между кольцами и зеркалом гильзы цилиндра. В результате этого между верхним поршневым кольцом и зеркалом гильзы цилиндра возникает полусухое или даже граничное трение, порождающее значительные эрозионные износы. Кроме того, одной из основных причин износа гильз цилиндров является также газовая коррозия как результат действия продуктов сгорания на металлические стенки [42].

Как показывают многочисленные исследования [25, 69, 71, 81], одним из эксплуатационных факторов, влияющих на износ гильз цилиндров, является запыленность воздуха, засасываемого в цилиндры двигателя. Работа деталей на запыленном воздухе, а также загрязненном масле приводит к их повышенному износу.

Другой определяющий фактор, влияющий на величину и характер износа деталей двигателя, – температурный режим. Исследования [54, 58, 120, 148] показывают, что работа двигателя при температурах ниже оптимальных приводит к повышенному коррозионному износу.

Как было отмечено, одной из наиболее тяжёлых составляющих условий работы ЦПГ является температурный режим. Независимо от способа форсирования двигателя повышение литровой мощности вследствие модернизации неизбежно приводит к росту температуры (рисунки 1.4–1.6) [11, 44–50, 79, 80].

Как видно из рисунков 1.4 и 1.5, температура деталей ЦПГ достигает 340 °С, а при неблагоприятных условиях пиковые температуры бывают и выше.

«При попадании пыли и продуктов износа в моторное масло возрастает доля абразивного износа поршневых колец. Если при этом размер абразивных частиц меньше толщины масляной плёнки, образующейся между трущимися деталями, то они не оказывают существенного воздействия на процесс износа. Но, как было показано, рабочая температура деталей ЦПГ высока, что приводит к снижению вязкости масла и, следовательно, к снижению толщины масляной плёнки» [80]. Зависимость износа поршневых колец дизелей при высокой температуре от вязкости масла приведена на рисунке 1.6.

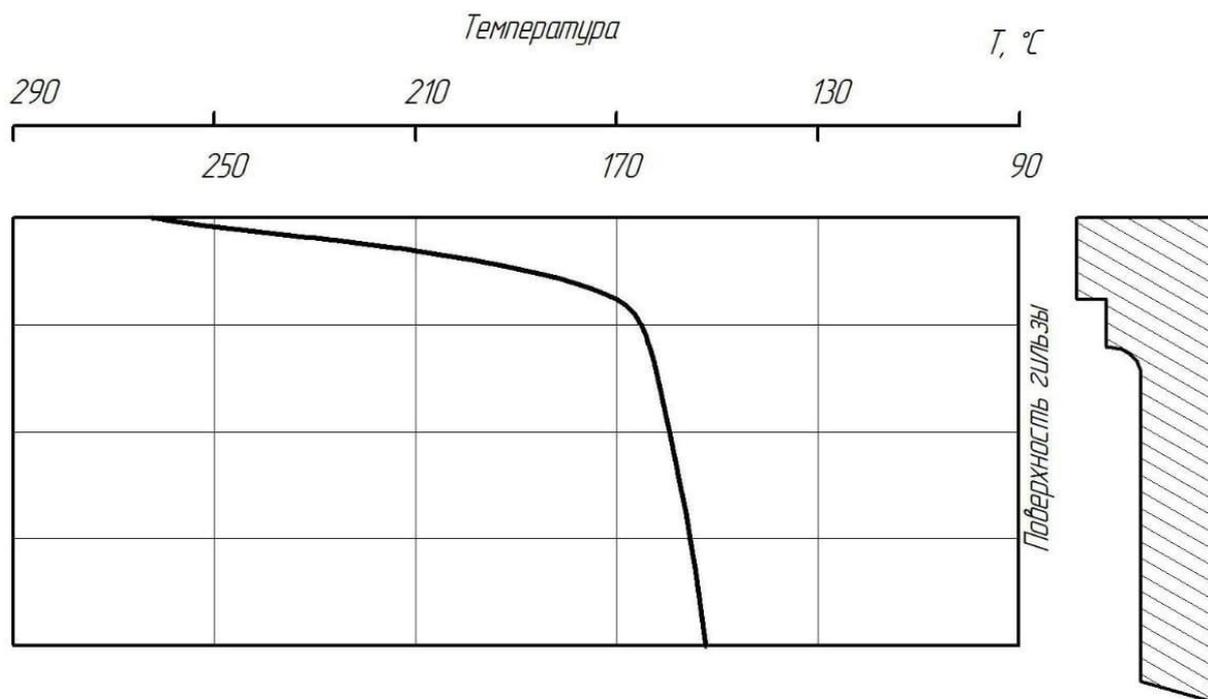


Рисунок 1.4 – Распределение температуры по поверхности гильзы

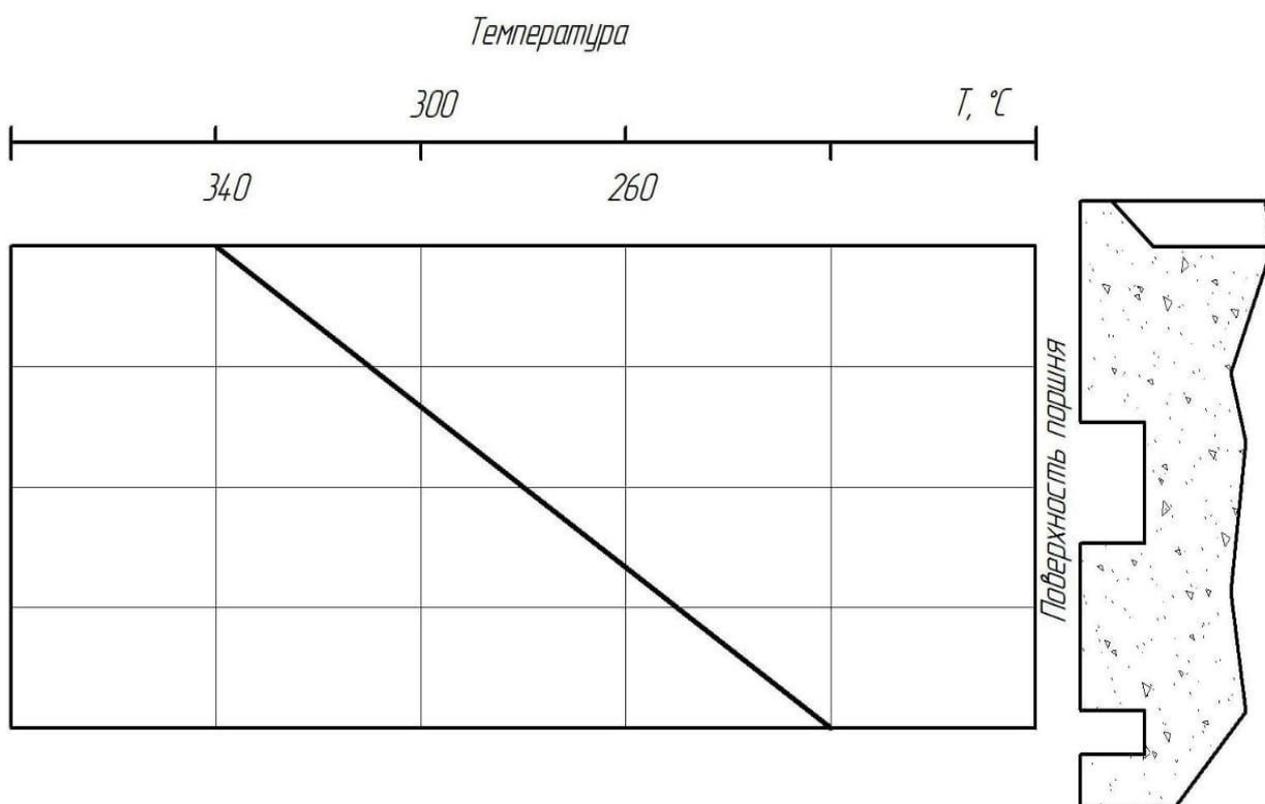


Рисунок 1.5– Распределение температуры по поверхности поршня

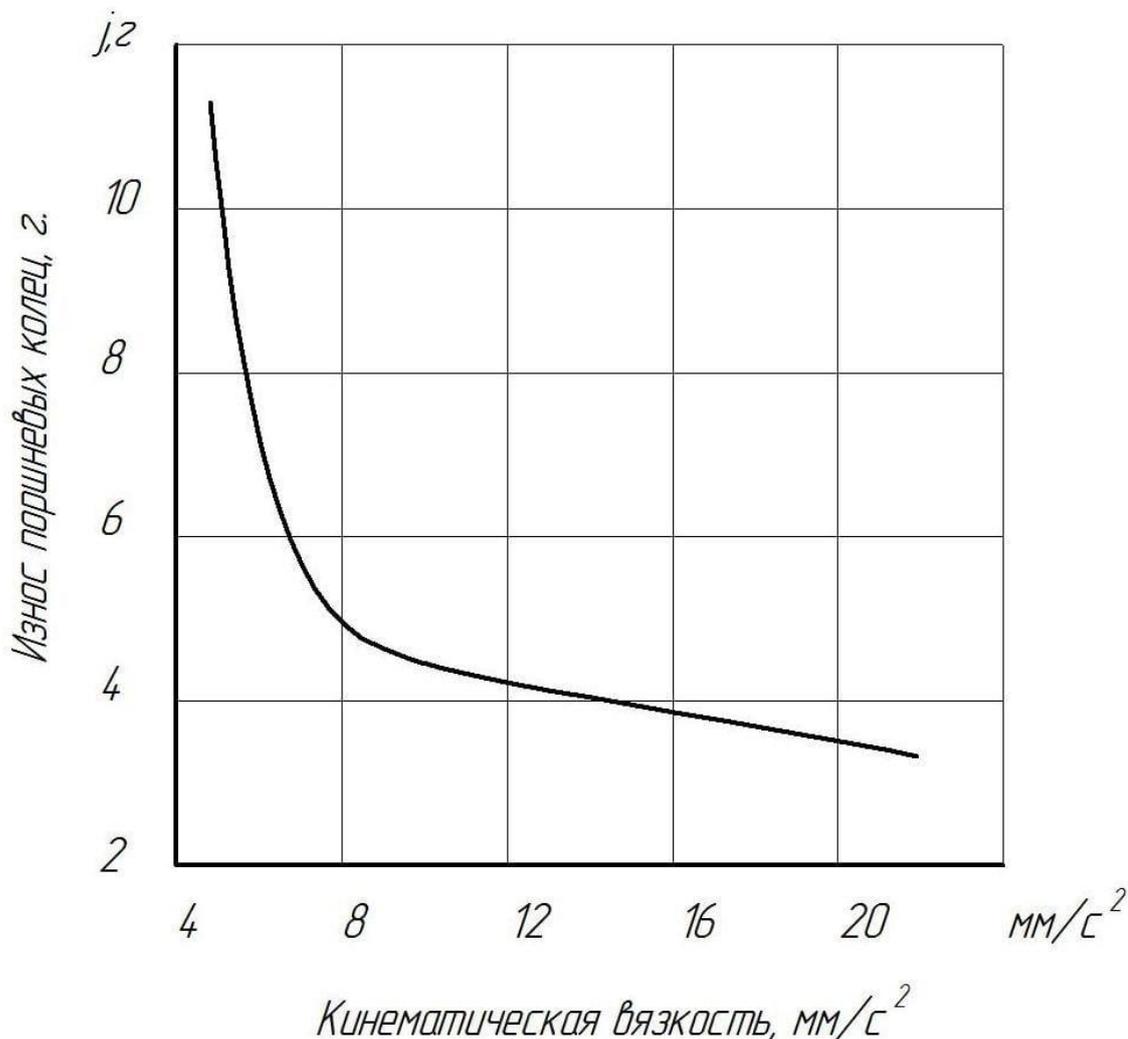


Рисунок 1.6 – Зависимость износа поршневых колец от кинематической вязкости масла

Функция поршневых колец – обеспечение герметичности камеры сгорания. В основном эти детали изготавливают из специального чугуна. Для увеличения износостойкости верхние поршневые кольца покрывают слоем пористого хрома или молибдена, а иногда на них наносят тонкий слой (5...10 мкм) антифрикционного покрытия для улучшения прирабатываемости.

В сопряжении колец с зеркалом цилиндра имеет место постоянное изменение скорости движения и давления газов, периодически возникает вибрация колец, происходит их тепловая и механическая деформация, особенно при наличии износа рабочей поверхности цилиндра.

Говоря об износе колец, следует разграничивать:

- износ колец в радиальном направлении;
- износ по высоте;
- увеличение зазора в замке кольца;
- снижение упругости кольца по мере его износа.

Износ кольца в радиальном направлении является следствием трения его наружной поверхности о зеркало гильзы цилиндра. Интенсивность этого износа зависит от материала кольца и гильзы, качества обработки и состояния их поверхностей, упругости кольца, качества смазки и температуры смазочного слоя, давления рабочих газов, частоты вращения коленчатого вала, нагрузки и ряда других факторов.

Износ кольца по высоте происходит в основном в результате его осевого и радиального перемещения в канавке поршня.

Износы поршневого кольца по радиусу и высоте – основные. Другие виды износа колец – увеличение зазора в замке и потеря упругости – следствие первых двух.

Поршни современных автотранспортных двигателей изготавливают из алюминиевого сплава. Направляющая часть поршней подвержена износу меньше, чем гильзы цилиндров. Абсолютная величина износа данной части поршня не лимитирует долговечность цилиндропоршневой группы. Фактическую долговечность поршней обычно определяет износ поршневых канавок, особенно верхней. Износ происходит в основном за счет нижних плоскостей. Причиной такого износа является то, что в период рабочего хода поршневые кольца получают значительный толчок. Это и определяет преобладание износа нижней плоскости канавки.

По мере увеличения торцевого зазора возникают ударные нагрузки на верхнюю плоскость канавки, что вызывает ее износ, который, однако, значительно меньше износа нижней плоскости.

Повышенный износ верхней поршневой канавки объясняется также тем, что максимальные давления и температура действуют в первую очередь на верхнее поршневое кольцо.

Торцевые зазоры между поршневыми кольцами и канавками поршня по мере

износа гильзы цилиндров увеличиваются.

В процессе работы поршневые кольца непрерывно расширяются и сжимаются, т. е. перемещаются в поршневых канавках в плоскости, перпендикулярной направлению движения поршня. Чем больше изнашивается зеркало гильзы цилиндра, тем интенсивнее становится движение поршневых колец в своих канавках и тем больше усиливаются износы их торцевых плоскостей и стенок канавок.

Износ указанного сопряжения сопровождается повышением свободы перемещения поршневых колец вдоль поршня. При такте всасывания поршень стремится опередить кольца, особенно верхнее, в результате чего возникают удары верхних стенок канавок о торцевые поверхности колец. При рабочем ходе кольца стремятся опередить поршень, и нижняя торцовая поверхность кольца ударяется о нижнюю стенку канавки. Удары усиливают износ сопряженных поверхностей и ускоряют нарастание торцевого зазора.

Торцевой износ поршневых колец и износ стенок поршневых канавок увеличивают прорыв газов из камеры сгорания в картер двигателя.

По мере изнашивания наружной цилиндрической поверхности одновременно с потерей упругости растет и зазор в замке кольца, что приводит к повышенному прорыву газов в картер двигателя, падению компрессии в его цилиндрах, увеличению расхода горючего, снижению мощности и другим отрицательным последствиям.

Износ деталей ЦПГ нарушает ее работоспособность, которая определяется по изменению показателей, характеризующих техническое состояние сопряжений деталей этой группы.

1.2 Анализ характеристик моторных масел, используемых в двигателях автотранспортной техники

Надежность современных автотранспортных двигателей в основном зависит от качества применяемого масла. Качество масла и конструкция двигателя взаимосвязаны.

В настоящее время в нашей стране классификация моторных масел регламентируется ГОСТ 17479.1-2015 [37, 55], согласно которому сезонные моторные

масла разделены на 7 классов вязкости (от 6 до 20 мм²/с при 100 °С), а всесезонные – на 10 классов и 6 групп по эксплуатационным свойствам и в зависимости от области применения (таблица 1.2). Эта классификация увязывает условия эксплуатации двигателей с уровнем эксплуатационных свойств моторных масел.

Всем моторным маслам присвоен индекс М. В зависимости от области применения по ГОСТ 17479.1-2015 для них установлены группы А, Б, В, Г, Д и Е (см. таблицу 1.2).

Таблица 1.2 – Классификация моторных масел по эксплуатационным свойствам [37]

Группа масла по эксплуатационным свойствам	Рекомендуемая область применения
А	Нефорсированные карбюраторные и дизельные двигатели
Б ₁	Малофорсированные карбюраторные двигатели
Б ₂	Малофорсированные дизели
В ₁	Среднефорсированные карбюраторные двигатели
В ₂	Среднефорсированные дизели
Г ₁	Высокофорсированные карбюраторные двигатели
Г ₂	Высокофорсированные дизели
Д	Высокофорсированные дизели, работающие в тяжелых условиях
Е	Малооборотные дизели с лубрикаторной смазочной системой, работающие на тяжелом топливе с содержанием серы до 3,5 %

«В зарубежных странах системой классификации моторных масел является спецификация SAE J300, которая разделяет моторные масла по вязкостно-температурным характеристикам и регламентирует их по трем показателям: минимальной кинематической вязкости при 100 °С, динамической вязкости при отрицательных температурах и предельной температуре прокачиваемости. Особенностью зарубежной классификации является то, что вязкость лимитируется интервалом 5 °С, что удобно для потребителей» [135].

На современном рынке смазочных материалов в основном представлены моторные масла следующих производителей: Лукойл, Газпромнефть, Роснефть, G-Energy, Sintec, AKross, Spectrol, Татнефть, BP Visco, Consol, Xado, Castrol, Esso, Liqui Moly, Mannol, Mobil, Nordix, Spectrol, Havoline, Fuchs, Motul, Ravenol, Teboil, Texaco, Wellrun и т. д.

Современные моторные масла, предназначенные для смазки двигателей, представляют собой сложную смесь углеводородов, их производных и присадок, обладающих различными функциональными свойствами.

Применение масел с многофункциональными присадками способствует повышению надежности двигателей.

Эксплуатационные свойства моторных масел определяются качеством и количеством вводимых присадок, а также, что особенно важно, их стабильностью.

Поскольку мощность современных двигателей непрерывно растет, то и моторные масла должны обладать более высокими эксплуатационными свойствами, которые определяются количеством и качеством присадочных композиций. «Так, в 1967 г. содержание присадочных композиций составляло до 5 %, в 1969 г. – до 10 %, в 1974 г. – до 15 %, в 2020 г. – 25 % и более по отношению к базовому маслу. В современных условиях наблюдается тенденция дальнейшего увеличения концентрации присадок в маслах» [135].

Присадки, вводимые в моторные масла, подразделяются на вязкостные (модификаторы вязкости, депрессанты); присадки, улучшающие смазывающие свойства (противоизносные, модификаторы, понижающие трение, растворимые и твёрдые противозадирные присадки); антикоррозионные (ингибиторы коррозии, присадки против ржавления); антиокислительные (ингибиторы окисления, деактиваторы металлов); моющие (детергенты, дисперсанты) и дополнительные (эмульгаторы, противопенные, присадки для обкатки и восстановительные) [9, 67, 68, 115, 150, 152, 160, 162, 163].

Всесезонные масла должны иметь низкую зависимость вязкости от температуры, т. е. масло должно быть достаточно текучим при низкой температуре и достаточно вязким при высокой. Это достигается путем введения вязкостных присадок – полимерных загустителей. При низкой температуре, когда масло вязкое, молекулы полимера находятся в скрученном виде и мало влияют на вязкость. С повышением температуры их растворимость увеличивается, они раскручиваются и повышают вязкость масла. Таким образом подавляется зависимость вязкости масла от температуры (повышается индекс вязкости).

При значительном понижении температуры смазочного масла из него начинают выпадать парафиновые кристаллы в виде игл и пластин с образованием пространственной кристаллической решетки, что приводит к потере подвижности масла (желатинизации) и затрудняет низкотемпературный запуск двигателя. Низкотемпературная текучесть таких масел может быть улучшена глубокой депарафинизацией. Обычно масла депарафинируют лишь частично до температуры застывания (около $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Дальнейшее понижение температуры застывания достигается введением депрессорных присадок, которые в состоянии понизить температуру желатинизации (застывания) еще на $20\dots 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ путем подавления срастания кристаллов парафина; при этом они не предотвращают появления этих кристаллов. Физическая температура застывания всего масла, как правило, значительно ниже температуры кристаллизации парафинов – его составной части. В качестве депрессорных присадок применяют алкилнафталины, алкилфенолы и другие полимерные продукты. Концентрация депрессантов составляет $0,05\text{--}1,0\%$.

Противоизносные присадки вводят в масла для уменьшения износа и увеличения адгезии. Роль таких присадок выполняют жирные спирты, амиды, сложные эфиры, соединения фосфора и др., образующие химическую связь с поверхностью металла. При помощи таких присадок улучшается липкость даже при низкой вязкости масла. Чем больше прочность образованной пленки и чем сильнее она связана с поверхностью металла, тем меньше может быть вязкость масла для достижения такого же смазывающего эффекта и уменьшения износа деталей, а с применением менее вязкого масла снижаются потери энергии на прокачиваемость.

В качестве соединений, обладающих противоизносным и антифрикционным действием, применяют поверхностно-активные вещества (ПАВ). «Эти соединения отличаются выгодной конфигурацией молекулы, т. е. длинной неразветвленной углеводородной цепью с активной концевой группой COOH . Эта структура соответствует высшим жирным кислотам и их эфирам. Даже небольшое количество ПАВ в масле приводит к существенным результатам. Молекулы ПАВ образуют слой толщиной около 20 нм . Однако при нагревании толщина этого слоя уменьшается вследствие дезориентации молекул, а при температуре около $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ смазочный слой разрушается» [135].

Модификаторы, понижающие трение, – это присадки, улучшающие антифрикционные свойства, снижающие коэффициент трения смазываемых поверхностей. В качестве таких присадок применяют соединения, в молекуле которых имеется сильная полярная группа, обеспечивающая хорошее прилипание, и длинная линейная цепочка, обеспечивающая хорошее скольжение. Применение подобных присадок создает дополнительные возможности для создания «энергосберегающих» масел.

В процессе работы трибосопряжений адсорбционная плёнка смазочного материала на поверхности трения может разрушаться в результате высокой нагрузки и возникающего нагрева контактирующих поверхностей металла (выше 150...190 °С). Вследствие этого коэффициент трения повышается еще более, что может привести к свариванию и заеданию деталей. Этого можно избежать за счет присадок, содержащих соединения серы, фосфора, хлора и др., которые в местах наивысшего трения и высоких температур разлагаются с выделением соответствующих активных элементов, реагирующих с металлом и образующих сульфидную, фосфидную, хлоридную твердую хемосорбционную пленку – твердую смазку. Такая пленка является значительно более стойкой, чем адсорбционная, она может защитить поверхности трения от износа в условиях большой нагрузки и высокой температуры. Так как активные элементы выделяются из присадок и реагируют с металлом только на выступах поверхности, в местах соприкосновения, то имеет место процесс выравнивания и полировки. Роль фосфора и серы несколько различается: фосфор лучше выравнивает поверхность и уменьшает износ, а сера уменьшает трение. В присутствии обоих этих элементов смазывающая способность масляной основы значительно повышается как при большой нагрузке, так и при большой скорости скольжения.

Твёрдые противозадирные присадки и добавки в виде дисульфида молибдена, полититаната калия [15, 18, 90, 109, 110, 165–169], политетрафторэтилена (фторопласт, тефлон, ПТФЭ, РТФЕ) и графита в масле имеют коллоидную структуру, а на поверхности трущихся деталей образуют твердую и прочную противозадирную и противозадирную пленку. Их критическая рабочая температура выше,

чем растворимых антифрикционных присадок. Уменьшение трения достигается за счет легкого скольжения слоистой присадки.

Ингибиторы коррозии защищают поверхность вкладышей подшипников и других деталей из цветных металлов от коррозионного износа, вызываемого органическими кислотами. Механизм защиты состоит в образовании защитной пленки и нейтрализации кислот. Для этих целей применяют диалкилдитиофосфат цинка и другие соединения серы и фосфора.

Присадки против коррозии защищают стальные или чугунные стенки цилиндров, поршни и поршневые кольца при воздействии водного раствора кислоты. Механизм защиты – образование адсорбированной защитной пленки, предохраняющей поверхность металла от непосредственного контакта с водным раствором кислоты. Для этой цели применяют аминсукцинаты и сульфонаты щелочных металлов – в основном сильные ПАВ – детергенты.

Ингибиторы окисления подавляют окисление масла в начальной его стадии путем взаимодействия с первичными продуктами реакции окисления – перекисями с образованием неактивных соединений, не способных к продолжению цепной реакции окисления. Многие антиокислительные присадки, снижающие образование кислот, уменьшают коррозию, т. е. антиокислительные присадки являются одновременно и антикоррозионными.

Деактиваторы металлов – другая группа антиокислительных присадок, подавляющая каталитическое действие ионов металлов на окисление масла. В качестве деактиваторов применяют органические соединения (этилендиамины, органические кислоты), связывающие ионы металлов в неактивные комплексы. В последнее время в зарубежной литературе появились данные о том, что небольшое количество ионов меди в моторных маслах, наоборот, является эффективным антиоксидантом и его специально вводят в некоторые сорта масел. Это следует учитывать при анализе работающих или отработанных моторных масел. В качестве деактиваторов перекисей применяют фенолы и амины (например, ионол), а в качестве деактиваторов металлов – органические соединения серы, фосфора и др. Самым распространенным антиокислителем в настоящее время является диалкилдитиофосфат

цинка. Его используют и как противозадирную присадку. В новых высококачественных моторных маслах диалкилдитиофосфата цинка содержится до 1,4 %.

Детергенты являются поверхностно-активными веществами, обладающими моющими свойствами, защищающими поверхность деталей от прилипания и скопления на них продуктов окисления. Анионные детергенты – это обычно маслорастворимые алкилбензолсульфонаты, фосфонаты и другие аналогичные соединения. Некоторые сульфонаты имеют щелочные свойства и являются эффективными нейтрализаторами кислых продуктов окисления. По щелочности, которая характеризует эффективность присадок, сульфонаты делятся на нейтральные (10–30 мг КОН/г), щелочные (30–100 мг КОН/г) и очень щелочные (100–300 мг КОН/г). В состав щелочных присадок могут входить диспергированные окиси, гидроокиси и карбонаты металлов. Щелочные присадки необходимы в маслах для дизелей с целью нейтрализации серной кислоты, которая образуется при сгорании сернистого дизельного топлива.

Дисперсанты препятствуют агломерации и слипанию продуктов окисления, образованию шлама или осаждению смолистых отложений на поверхности деталей. В качестве дисперсантов обычно применяют полимеры с полярными группами и сукцинимиды. Они поддерживают коллоидные частицы продуктов окисления и загрязнений во взвешенном состоянии. При эффективной работе дисперсантов моторное масло темнеет, а диспергированные мелкие продукты окисления не забивают фильтр и не осаждаются на деталях двигателя.

Эмульгаторами служат детергенты. Они понижают поверхностную энергию жидкостей, вследствие чего вода в масле образует стойкую эмульсию и не выделяется в отдельный слой.

Пенообразование нарушает нормальную работу системы смазки: смазывание трущихся поверхностей становится недостаточным из-за разрывов масляной пленки, ухудшается работа гидравлических систем, ускоряется процесс окисления масла в присутствии кислорода воздуха. В состав противопенных присадок обычно входят силиконовые масла – полиалкилсилоксаны и некоторые другие полиме-

ры. Силиконовые масла разрушают стенки крупных пузырей, а полимеры уменьшают количество мелких пузырей.

Восстановительные присадки и добавки – это в основном суспензии порошков пластичных металлов в масле. Такие присадки и добавки не только уменьшают износ поверхностей трения, но и в некоторых случаях металлизуют их, восстанавливая прежние размеры деталей. Однако введение восстановительных присадок и добавок в состав товарных масел по ряду причин не практикуется [26, 52, 77, 85, 92–94, 100, 117, 121, 133, 134, 142].

1.3 Обзор современных металлсодержащих присадок и добавок к моторным маслам для улучшения их эксплуатационных свойств и снижения износа деталей

«За последние годы параметры отечественных автотранспортных двигателей существенно изменились: мощность двигателей увеличилась на 50 % и более, частота вращения и среднее эффективное давление – на 20 % и более при одновременном уменьшении массы двигателя на 35 %. В дальнейшем машиностроительными предприятиями планируется увеличение мощности еще на 30 %, снижение металлоемкости на 10 %, повышение ресурса двигателей до первого капитального ремонта до 8000 мото-ч и более. Для достижения запланированных технико-экономических показателей автотранспортных двигателей новых конструкций необходимо наряду с решением технологических и конструкторских проблем улучшать эксплуатационные свойства моторных масел с помощью присадок» и добавок к ним [2, 135].

Известно, что большое влияние на износостойкость поверхностей трения деталей оказывает поверхностная пленка. Одним из вариантов формирования поверхностных пленок с необходимыми трибологическими свойствами является введение в базовое масло разнообразных металлсодержащих присадок, которые в зависимости от конструкционно-технологических особенностей пары трения и условий эксплуатации могут существенно различаться.

В связи с вышесказанным, кроме маслорастворимых, «все более широкое распространение находят присадки, содержащие порошки чистых металлов и спла-

вов, которые принято называть добавками. Для повышения противоизносных, антифрикционных и противозадирных свойств смазочных материалов применяют такие металлы и сплавы, как медь, олово, цинк, алюминий, никель, кобальт, серебро, кадмий, бронза, латунь и др.» [12, 13, 31, 33, 87, 103, 129].

Так, например, М. В. Астаховым с соавторами «разработана металлоплакирующая смазочная композиция, содержащая минеральное масло и порошкообразный наполнитель, состоящий из твердого раствора железа с никелем, железа, никеля, карбида железа и активированного угля. Данную смазочную композицию добавляют для снижения износа поверхностей трения и температуры узла трения» [129, 130].

В научно-исследовательском институте высоких напряжений при Томском политехническом университете разработан смазочный состав, содержащий смесь мелкодисперсных порошков алмаза и железа [105]. Средний диаметр частиц порошка составляет 0,04 мкм. Смазочный состав предназначен для ускорения приработки деталей в узлах трения, он обеспечивает низкий коэффициент трения и высокую седиментационную устойчивость порошкообразного наполнителя.

Институтом металлургии при Московском институте химического машиностроения разработаны приработочные смазочные композиции, содержащие ультрадисперсный карбид (карбонитрид) титана. Размер частиц порошка 10...500 нм.

ЗАО «Институт прикладной нанотехнологии» в качестве неорганической добавки предлагает использовать наночастицы в виде кластеров кремния, оксида церия или оксида титана с дисперсностью 10...100 нм при концентрации 0,1–1,5 % по массе [95].

Известна добавка, выполненная в качестве присадки к моторному маслу в виде мелкоизмельченного сплава олова со свинцом, содержащего 60–95 % олова. Порошок сплава имеет размер частиц менее 0,2 мкм [56].

В ОАО «Научно-исследовательский и конструкторский институт химического машиностроения» (Россия) разработана высокотемпературная смазочная композиция, содержащая добавку в виде ультрадисперсного порошка углекислого кальция с размером частиц не более 0,1 мкм, олеиновую кислоту и базовую основу [88].

Противоизносная добавка к смазочным маслам «Валерин», предназначенная

для улучшения их противоизносных свойств, содержит твердофазный компонент [14]. «В качестве твердой фазы использован сепарированный продукт, выделенный из отработанной вододисперсионной смазочно-охлаждающей жидкости после волочения медной проволоки. Размер частиц меди 0,1...20 мкм» [135].

Интерес представляют разработки ООО НПК «ВМПАвто» (г. Санкт-Петербург). К ним относятся добавки к моторным маслам «Ресурс» и Rametall, а также смазочная композиция, где в качестве порошкообразного металлического наполнителя использованы сплавы, выбранные из ряда: медь – олово – серебро; медь – олово; цинк – кадмий; алюминий – олово – медь при концентрации 0,05–15,0 % по массе [99].

Добавка к моторным маслам «Ресурс» создана на основе ультрадисперсных порошков меди, олова, хрома. Ее применяют для восстановления и защиты от износа карбюраторных, инжекторных и дизельных двигателей, снижения интенсивности изнашивания, шума, вибраций и т. д. [94].

Rametall предназначена для восстановления деталей двигателя за счет создания в зоне трения маслоудерживающей пористой структуры, защищающей детали от изнашивания.

ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов» (Россия) запатентовало смазочную композицию, включающую в себя порошкообразный наполнитель, состоящий из смеси наноразмерных порошков дисульфида молибдена и сплава порошков латуни и фосфора, содержащий 15 % раствора карбамида в 10%-м водном растворе аммиака. Дисперсность порошкообразного наполнителя составляет 10...50 нм [100, 114, 137, 161, 164].

Сотрудники ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» разработали добавку к смазочным материалам, содержащую нанопорошок меди, размеры частиц 90...138 нм [111].

В России разработана добавка к смазочным маслам, включающая в себя ультрадисперсный порошок сплава меди, никеля и фосфора [113].

Коллектив авторов ФГБОУ «Бурятский государственный университет» (Россия) разработал способ получения модифицирующей медьсодержащей добавки для смазочного материала, предполагающий добавление наноразмерного порошка меди со средним размером частиц 120 нм [107].

Широкое распространение имеют металлсодержащие добавки и за рубежом. Во Франции выпускаются противозадирная добавка Corper, содержащая частицы рафинированной меди и свинца, а также известный своими залечивающими свойствами препарат Metal-5, частицы которого представляют собой сплав меди, цинка и серебра дисперсностью 1...5 мкм. В Венгрии применяют металлоплакирующую добавку Eska, включающую в себя твердофазный компонент.

Дилеры смазочных материалов предлагают также порошковую медно-свинцово-серебряную добавку к моторному маслу Metalyz 6/8 Lubrifilm Motor Active (производитель – Actex S. A., Швейцария). При её использовании производитель обещает восстановление и предотвращение дальнейшего износа деталей двигателя (цилиндров, вкладышей коленчатого вала, подшипников) за счет создания металлической композиционной пленки [97].

Согласно анализу литературных данных и смазочных композиций, применяемых в нашей стране и за рубежом, широкое распространение в качестве антифрикционного и противоизносного компонента получил порошок дисульфида молибдена [15, 97, 98, 153–155]. Он отличается высокой смазочной способностью, хорошей адгезией к металлическим поверхностям и высокой эффективностью при малых концентрациях. Кристаллы двусернистого молибдена имеют гексагональную форму и образуют пластинчатую структуру. Каждая элементарная пластинка двусернистого молибдена имеет три слоя – внутренний, образованный атомами молибдена, и внешние, состоящие из атомов серы. Слой атомов серы обеспечивает высокую адгезионную связь частиц присадки с поверхностью трения и низкое сдвиговое сопротивление между трущимися деталями. Двусернистый молибден обладает большей термической устойчивостью, чем присадки органического происхождения, его можно применять при относительно высоких температурах.

В ГНУ «Институт механики и надёжности машин Национальной академии наук Беларуси» (Белоруссия) разработана смазочная композиция для тяжело-

нагруженных узлов трения на основе дисульфидмолибденовой пасты ВНИИ НП-225, которая содержит ультрадисперсные алмазы с размером частиц 8...30 нм и графит с размером частиц 0,1...1,0 мкм при следующем соотношении ингредиентов, % по массе: ультрадисперсные алмазы – 1,6–3,2; графит – 2,0–4,0; дисульфидмолибденовая паста ВНИИ НП-225 – остальное» [57].

Компания SHANXI LUAN TAIHANG CO LTD (Китай) в качестве композиции смазочного масла для дизельного двигателя предлагает смесь одного или двух противоизносных агентов с наноразмерной медью и комплекса с амином молибдена [156].

Сотрудники ОАО «Федеральный научно-производственный центр "Алтай"» (Россия) разработали смазочную композицию, содержащую масляную основу и алмазоуглеродный порошок детонационного синтеза с размером частиц 10...120 нм и концентрацией 0,1–0,5 % по массе [106].

Разработан состав антифрикционной порошковой композиции на основе серпентина. Она содержит серпентин $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ с вкрапленным магнетитом Fe_3O_4 при соотношении, % по массе: серпентин – 65–75; вкрапленный магнетит – 20–30; примеси – не более 5. Серпентин с вкраплениями магнетита имеет частицы размером не более 50...300 нм [89].

Немецкая добавка Wagner Universal Micro-Ceramic Oil (Eni S.p.A. Refining and Marketing) относится к нанопродуктам, она применяется в двигателях и механических коробках передач (КП). Эта добавка содержит мельчайшие керамические частицы [61].

В ООО НТЦ «КОНВЕРС-РЕСУРС» (Россия) разработан состав для повышения противоизносных и антифрикционных свойств узлов трения, содержащий смазочный материал и измельченный природный минерал серпентин (лизардит и хризотил) при концентрации 78–85 % по массе с дисперсностью не более 10 мкм [96].

В институте физико-технических проблем Севера СО РАН (Россия) разработан смазочный материал, содержащий добавку в виде микропорошка природного технического алмаза, концентрация которого 1–10 % по массе, остальное – базовое масло [104].

Огромное разнообразие существующих смазочных композиций позволяет заключить, что в настоящее время отсутствует единый подход к выбору состава и дисперсности порошкообразного наполнителя к современным добавкам. Обосновать этот выбор возможно лишь на основе глубокого изучения механизма действия порошоксодержащих смазочных композиций и исследования основных факторов, влияющих на процесс формирования поверхностей трения деталей машин.

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, В. Н. Монастырский, К. К. Папок, Н. Г. Пучков, К. С. Рамайя, П. А. Ребиндер, П. И. Санин, Е. Г. Семинидо, Ф. Г. Сулейманов, Д. Н. Тейбор, Г. И. Фукс, Н. В. Черножуков, А. В. Чичинадзе и многих других.

Анализ литературных данных показал, что механизм смазочного действия смазочных сред, содержащих порошкообразные компоненты, полностью не изучен, многие положения и взгляды на этот вопрос остаются спорными.

Ужесточение условий работы масел в современных теплонапряженных двигателях вызывает необходимость создания и применения новых высокоэффективных присадок и добавок и их композиций.

Основополагающий вклад в науку по исследованию и внедрению трибопрепаратов в целях повышения эксплуатационных показателей двигателей сельскохозяйственной техники внесли В. И. Балабанов, Д. Н. Гаркунов, В. Н. Дураджи, М. Н. Ерохин, С. А. Корнилович, В. П. Лялякин, П. И. Носихин, А. К. Ольховацкий, В. В. Остриков, В. В. Сафонов, В. В. Стрельцов, С. П. Хазов, А.Л. Хохлов, В. И. Цыпцын, В. И. Черноиванов, А. Ю. Шабанов, Г. П. Шаронов и др.

Анализ рассмотренных работ свидетельствует о том, что на эксплуатационные свойства масел двигателей автотранспортных средств оказывают влияние многие факторы. Несмотря на большое количество исследований в этой области, механизм воздействия различных присадок и добавок, режимов работы и других

факторов на противоизносные и противозадирные свойства масел изучен недостаточно. Кроме того, в связи с появлением новейших технологий получения порошкообразных металлических материалов нанометровых размеров и возможности их использования в качестве добавок к смазочным средам появились вопросы, требующие дополнительного изучения. В данной области необходимы дополнительные исследования процесса изнашивания основных пар трения двигателей в различных смазочных средах в лабораторных условиях, а также проведение стендовых и эксплуатационных испытаний двигателей на износ с использованием как базовых, так и экспериментальных смазочных композиций.

Как следует из анализа патентов на изобретение порошкообразных добавок, исследователи смазочных материалов уделяют большое внимание свойствам частиц ультра- и наноразмерных порошкообразных материалов (УНПМ) в связи с тем, что они обладают рядом преимуществ по сравнению с крупными порошками: высокая химическая активность, седиментационная устойчивость, возможность получения существенного эффекта при малой концентрации и т. д.

В результате анализа способов получения наноразмерных порошков (НРП) был выбран метод плазменной перекомденсации, основанный на испарении крупнодисперсного порошка или прутка исходного материала в плазменном потоке с температурой 5000...8000 К и конденсации пара до частиц требуемого размера. Этим способом в условиях ОП ФГУП «ГНИИХТЭОС» – Научно-исследовательская лаборатория № 33 синтезированы следующие группы НРП дисперсностью 10...50 нм с удельной поверхностью 100...150 м²/г (рисунок 1.7): чистые, бинарные, легированные, композиционные [112].

В ФГБОУ ВО «Вавиловский университет» на кафедре «Техническое обеспечение АПК» на протяжении ряда лет проводятся трибологические исследования ультра- и наноразмерных порошков цветных металлов, их сплавов и легированных соединений.

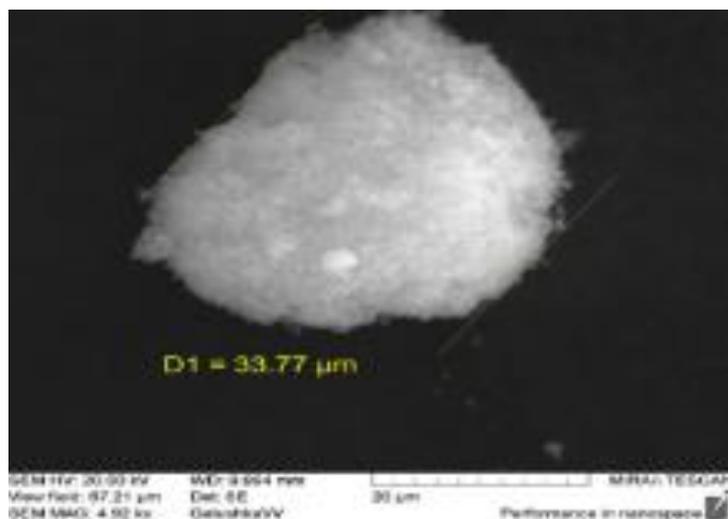


Рисунок 1.7 – Наноразмерная частица металла, полученная плазменной переконденсацией

Проведенные предварительные лабораторные исследования показали, что применение нанопорошков, полученных из сплавов меди, значительно снижает скорость изнашивания трущихся поверхностей, а при продолжительных испытаниях даже приводит к увеличению массы деталей [118].

Однако в ходе трибологических исследований установлено, что использование нанопорошка сплава меди и цинка (латуни Л60) в составе смазочных сред не приводит к значительному снижению коэффициента трения в трибосопряжениях техники, а в первоначальный период формирования поверхностей трения деталей даже способствует его увеличению.

В связи с этим для повышения антифрикционных свойств смазочной композиции, предлагается дополнительно использовать ультрадисперсный порошок, снижающий коэффициент трения между трущимися поверхностями деталей.

Известно, что наибольшее распространение в качестве антифрикционной добавки имеет порошок дисульфида молибдена благодаря его высокой смазочной способности и хорошей адгезии к металлическим поверхностям.

Однако минимальный размер частиц дисульфидного молибдена, выпускаемого отечественной промышленностью, составляет 1...3 мкм, что указывает на их низкую стабильность в смазочной среде. Кроме того, в литературе имеются данные о повышенном износе деталей ДВС, работающих на моторном масле, содержащем добавку дисульфида молибдена [127]. Другим недостатком дисульфидного

молибдена является высокая стоимость, что существенно ограничивает возможность его применения в составе смазочных материалов.

Анализ литературных данных показывает, что применение ультра- и наноразмерных порошкообразных материалов, таких, как графит, трисульфид молибдена, фторсодержащие полимеры, а также полититанат калия, позволяет получить более высокие трибологические характеристики смазочных сред по сравнению с использованием традиционных антифрикционных добавок на основе дисульфида молибдена, обладающего, как было уже отмечено, существенными недостатками.

Из числа перечисленных УНПМ особый интерес в настоящий момент вызывают полититанаты калия (ПТК) – соединения с общей химической формулой $K_2O \cdot nTiO_2$, которые представляют собой новый вид функциональных материалов, используемых в различных направлениях техники, в том числе и в смазочных средах [143].

ПТК аналогично графиту и дисульфиду молибдена имеет слоистую структуру (рисунок 1.8). Слои материала сформированы титан-кислородными октаэдрами, в пространстве между которыми расположены ионы калия.

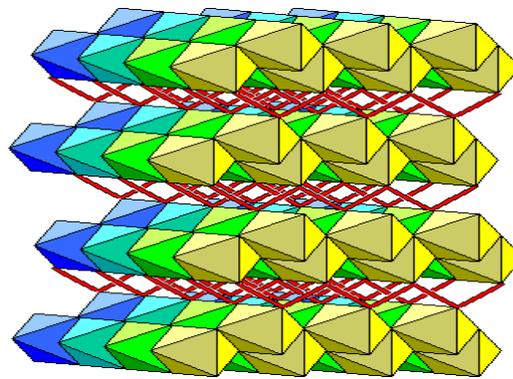


Рисунок 1.8 – Структура полититаната калия

ПТК, являющийся промежуточным продуктом синтеза волокнистых титанатов калия, состоит из частиц чешуйчатой формы, имеющих линейные размеры 200...800 нм и толщину 50...100 нм. В ходе синтеза, проводимого при 450...550 °С, и последующей промывки водой образуются агломераты частиц, которые далее диспергируются до субмикронного размера ультразвуковой обработкой в среде H_2O (рисунок 1.9).

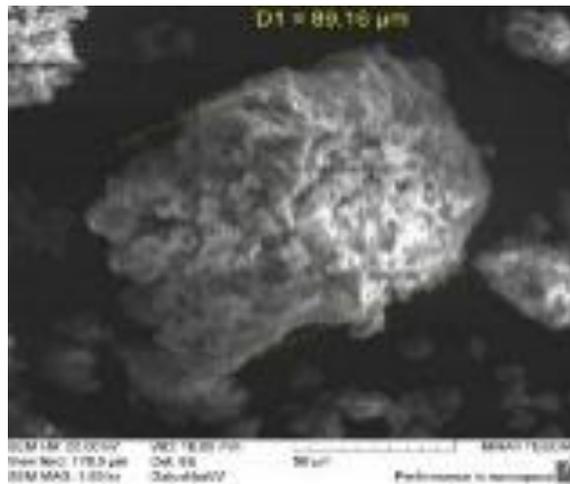


Рисунок 1.9 – Частица полититаната калия

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о необходимости разработки состава ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу на основе ультра-и наноразмерных порошкообразных материалов, применение которой позволит повысить эффективность проведения операций технического сервиса, что приведет к снижению интенсивности изнашивания трущихся поверхностей и частичному или полному восстановлению зазоров между контактирующими деталями агрегатов машин.

Одним из наиболее приемлемых вариантов сохранения показателей работы двигателей следует считать повышение эффективности операций технического сервиса с применением современных экспресс-технологий, подразумевающих использование эксплуатационно-восстановительных добавок. Это будет способствовать снижению интенсивности износа трущихся деталей, частичному или полному восстановлению зазоров между трущимися деталями, что в итоге приведет к повышению ресурса двигателя и автомобиля в целом.

1.4 Выводы по главе

1. Анализ неисправностей по системам и агрегатам, возникающих в процессе эксплуатации автомобилей семейства КАМАЗ, показал, что до 39 % отказов приходится на двигатель. Доля отказов элементов двигателей КАМАЗ-740.11-240 (цилиндропоршневая группа) составляет 8 %, а доля затрат на запасные части и ремонтные работы двигателей – 75,0 и 68,9 % соответственно.

2. Наиболее эффективным способом повышения надежности двигателей автотранспортных средств следует считать модернизацию операций технического сервиса путем применения современных экспресс-технологий, подразумевающих использование эксплуатационно-ремонтных добавок к смазочным материалам, способствующих снижению скорости изнашивания трущихся деталей и частичному или полному восстановлению зазоров между контактирующими деталями.

3. Большое разнообразие существующих смазочных композиций позволяет заключить, что в настоящее время отсутствует единый подход к выбору состава и дисперсности порошкообразного наполнителя к современным добавкам. Обосновать этот выбор возможно лишь на основе глубокого изучения механизма действия порошкосодержащих смазочных композиций и исследования основных факторов, влияющих на процесс формирования поверхностей трения деталей машин.

4. Ужесточение условий работы моторных масел в современных модернизированных двигателях автотранспортной техники вызывает необходимость создания новых высокоэффективных надбазовых эксплуатационных добавок к ним.

Анализ позволил выделить для изучения наноразмерные добавки к смазочным материалам, полученные методом плазменной переконденсации сырья. Основными их компонентами являются наноразмерные порошки следующих металлов: медь, олово, свинец, цинк, алюминий, никель, кобальт, кадмий, серебро и их сплавы, а также антифрикционные ультрадисперсные порошки полититаната калия, полученные методом химического синтеза.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СНИЖЕНИЯ ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПОД ДЕЙСТВИЕМ РЕМОНТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОБАВКИ К МОТОРНЫМ МАСЛАМ

2.1 Математическая модель процесса изнашивания трущихся поверхностей деталей машин

Эксплуатационные свойства автотракторной техники (такие, как износостойкость, контактная жесткость, усталость, герметичность соединений и др.) в основном определяются контактным взаимодействием трущихся деталей.

Процесс контактирования деталей обусловлен геометрическими параметрами, характеризующими шероховатость (волнистость, отклонение от правильной геометрической формы), и физико-механическими свойствами сопрягаемых поверхностей.

На начальной стадии взаимодействия трущихся поверхностей при отсутствии смазки имеет место самый опасный и распространенный вид изнашивания – абразивный. Согласно литературным данным, он возникает при трении скольжения и является результатом действия абразивной среды на поверхностях трения деталей [64].

Взаимодействие поверхностей трения при абразивном изнашивании выражается в проскальзывании, срезании микрообъемов металла, образовании таким образом абразивных частиц и дальнейшем их внедрении в поверхности трения трущихся деталей.

Исследование изнашивания пар трения деталей машин, работающих в разных условиях, позволили установить, что вид износа и его интенсивность определяются тремя основными факторами:

- 1) механическими воздействиями на поверхности трения (вид трения, параметры шероховатости поверхностей, скорость относительного перемещения трущихся деталей, величина и характер нагрузки);
- 2) внешней средой (смазка, газовая среда, наличие инородных частиц между поверхностями трения);

3) свойствами трущихся деталей (механические свойства металлов, физико-химическими свойствами металла и др.).

Основным из указанных факторов является первый.

Известно, что внешнее трение характеризуется дискретностью контактирования [65], поэтому для моделирования процесса контактного взаимодействия реальных твердых тел, как правило, используют статистические методы, позволяющие достаточно точно представить состояние некоторых усредненных выступов, а также их распространение по поверхности трения контактирующих деталей.

Российские ученые-трибологи имеют значительные достижения в области контактного взаимодействия твердых тел при трении. Особо следует отметить работы И. В. Крагельского, Н. Б. Демкина, Э. В. Рыжова, Н. М. Михина, М. Н. Добычина, В. С. Комбалова, И.Г. Горячевой, Н. М. Алексеева, В. В. Алисина, А. В. Чичинадзе и др. [24, 34, 51, 63, 65–67, 75, 122, 139, 140].

Большой интерес для изучения представляет процесс контактного взаимодействия трущихся деталей при наличии смазочной среды. В связи с этим математическое моделирование процесса контактирования трущихся деталей без смазки и в ее присутствии является актуальным.

Математическое моделирование процессов трения и изнашивания деталей и его применение на стадии проектирования машин позволит исключить многие отказы узлов трения в условиях эксплуатации.

В связи с изложенным в работе на первом этапе была построена математическая модель процесса взаимодействия выступов шероховатости во время движения двух трущихся поверхностей деталей относительно друг друга, с помощью которой был рассмотрен данный процесс.

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 2.1). 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. Такое представление взаимодействующих поверх-

ностей деталей позволило уйти от рассмотрения всего множества точек поверхностей и дало возможность рассматривать локальный акт взаимодействия вершин шероховатости на участке определенной длины, называемого базой.

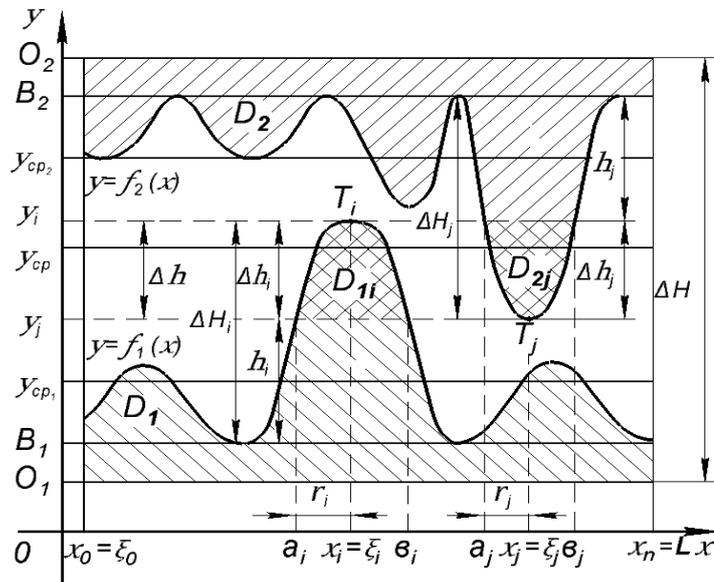


Рисунок 2.1 – Схема контакта трущихся поверхностей деталей на плоскости

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 .

Каждая произвольно выбранная часть поверхностей трения деталей в виде плоскостей D_1 и D_2 ограничена прямыми $x = x_0$, $x = L$ и $x = O_k$, линией графика функции $y = f_k(x)$, которая представила одну из зависимостей: $y = f_1(x)$ или $y = f_2(x)$. При этом линии шероховатости также были описаны уравнениями, в которых функции заданы неявно:

$$\begin{cases} \Phi_1(x; y) = 0; \\ \Phi_2(x; y) = 0; \end{cases} \quad (2.1)$$

На рисунке 2.1 видно, что длина базы для D_1 и D_2 равна длине интервала, ограничивающего указанные плоскости на оси Ox . Обозначим базы l_1 и l_2 , тогда:

$$|\text{длина базы}| = |x_0 L|, \quad \text{т. е. } |l_1| = |l_2| = |x_0 L|.$$

Направление взаимного движения плоскостей D_1 и D_2 происходило параллельно оси Ox вдоль линий $y = O_1$ и $y = O_2$ соответственно.

Графики функций $y = f_1(x)$ или $y = f_2(x)$ были построены исходя из известной формулы при выборе 10 опорных точек.

Для D_1 – точки $\xi_i, i = \overline{1,10}$ и для D_2 – точки $\xi_j, j = \overline{1,10}$;

$$R_{z_1} = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 h_i \max - \sum_{j=1}^5 h_j \min \right); R_{z_2} = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 h_i \max - \sum_{j=1}^5 h_j \min \right); \quad (2.2)$$

$$\Delta H_i = R_{z_1}; \quad \Delta H_j = R_{z_2},$$

где h_i и h_j – высоты неровностей профилей D_1 и D_2 , причем h_i – высота i -го выступа шероховатости; h_j – высота j -го выступа шероховатости.

Точки $\xi_i, i = \overline{1,10}$ произвольно разбили интервал $[B_1; L_1]$, а точки $\xi_j, j = \overline{1,10}$ – интервал $[B_2; L_2]$.

Рассмотрим окрестности точек $O(x_i = \xi_i)$ и $O(x_j = \xi_j)$.

Указанные окрестности – это интервалы $(\xi_i - \omega_i; \xi_i + \omega_i)$; ω_i и ω_j – радиусы окрестностей:

$$\begin{aligned} \omega_i &= \xi_i - a_i \text{ и } \omega_i = b_i - \xi_i; \\ \omega_j &= \xi_j - a_j \text{ и } \omega_j = b_j - \xi_j. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Пусть $\xi_i \in dx_i$ и $\xi_j \in dx_j$, причем в точке $T_i(x_i; y_i)$ получили локальный \max , а в точке $A_j(x_j; y_j)$ – локальный \min функций $y = f_1(x)$ и $y = f_2(x)$ соответственно.

$$dx_i = |b_i - a_i| = |B_1 L_1| \text{ и } dx_j = |b_j - a_j| = |B_2 L_2|,$$

т. е. $O(\xi_i) = dx_i$ и $O(\xi_j) = dx_j$.

Наличие точек минимума и максимума T_i и T_j показало существование выступов шероховатости: $y = y_i$ и $y = y_j$ – линии выступов шероховатости для D_1 и D_2 , $y = B_1$ и $y = B_2$ – линии впадин шероховатости. При этом сами точки являются вершинами выступов.

В процессе исследований были введены некоторые дополнительные обозначения для более детального описания процесса изнашивания:

$$h_i = y_j - B_1; h_j = B_2 - y_i;$$

$$\Delta h = \Delta h_i = \Delta h_j = y_i - y_j; \quad (2.4)$$

$$\Delta H_i = y_i - B_1; \Delta H_j = B_2 - y_j.$$

Тогда:

1) если разница координат по оси Oy $y_i - y_j > 0$, то процесс изнашивания контактирующих деталей имеет место;

2) если $y_i - y_j < 0$, то процесс изнашивания отсутствует.

Указанная разность между координатами y_i и y_j для двух вершин шероховатости определила высоту $\Delta h = \Delta h_i = \Delta h_j$ той части вершин шероховатости, которая была срезана в процессе движения одной части детали относительно другой. Пятнами шероховатости являются $O(\xi_i) = dx_i$ и $O(\xi_j) = dx_j$; dx_i , dx_j – соответствующие диаметры пятен шероховатостей для D_1 и D_2 .

Если рассматривать 10 опорных точек, то для всех вершин T_i и T_j :

$$\sum_{i=1}^{10} \left(\int_{a_i}^{b_i} f_{1i} dx - \int_{a_j}^{b_j} f_{2j} dx \right) < 0, \quad (2.5)$$

следовательно, процесс изнашивания отсутствует.

Если

$$\sum_{i=1}^{10} \left(\int_{a_i}^{b_i} f_{1i} dx - \int_{a_j}^{b_j} f_{2j} dx \right) > 0, \quad (2.6)$$

то вопрос существования процесса изнашивания решается при измерении высот выступов шероховатости h_i и h_j .

Для уточнения наличия износа и определения величины изменения зазора между трущимися поверхностями деталей были рассмотрены изменения высот выступов шероховатостей h_i и h_j в процессе движения поверхностей деталей относительно друг друга. Высотами выступов шероховатости оказались длины перпендикуляров, опущенных из их вершин T_i и T_j к линиям $y = B_1$ и $y = B_2$. Таким образом:

$$h_i = y_j - B_1; h_j = B_2 - y_i. \quad (2.7)$$

Так как в процессе трения $h_i \rightarrow 0$ и $h_j \rightarrow 0$, то были введены величины Δh_i и Δh_j , определяющие значения износов деталей.

Тогда предельная величина зазора между взаимодействующими деталями ΔH :

$$\Delta H_i = h_i + \Delta h_i \text{ и } \Delta H_j = h_j + \Delta h_j. \quad (2.8)$$

Пусть

$$\Delta H = \sum_{i,j=1}^n (\Delta H_i; \Delta H_j), \quad (2.9)$$

тогда

$$\Delta H = B_2 - B_1, \quad (2.10)$$

т. е.:

$$\Delta H = \sum_{i,j=1}^n \Delta h_i, \Delta h_j, h_i, h_j. \quad (2.11)$$

В процессе перемещения трущихся поверхностей деталей относительно друг друга суммарная высота всех выступов шероховатости в процессе износа стремится к нулю:

$$\Delta H \rightarrow 0.$$

Также сделать вывод о наличии износа I стало возможным при изучении линий вершин шероховатости. Для этого было использовано графическое изображение функций $y = f_1(x)$ и $y = f_2(x)$, описывающих линии шероховатости деталей (см. рисунок 2.1).

Объединив функции $y = f_1(x)$ и $y = f_2(x)$, получили систему уравнений:

$$\begin{cases} y = f_1(x); \\ y = f_2(x). \end{cases} \quad (2.12)$$

Существование хотя бы одного решения системы (2.12) указывает на ее совместность и на присутствие точек взаимного контакта поверхностей деталей, а значит, позволило сделать вывод о том, что износ I присутствует.

Вывод о наличии или отсутствии износа также был сделан при решении системы уравнений, записанной в неявном виде

$$\begin{cases} \Phi_i(x; y) = 0; \\ \Phi_j(x; y) = 0. \end{cases} \quad (2.13)$$

Было сделано предположение о том, что в процессе трения поверхностей деталей относительно друг друга возможно возникновение новых выступов шероховатости. Тогда был рассмотрен механизм их образования. Для этого разбили базу $|x_0L|$ произвольным образом точками x_k на интервалы dx_k , где $k = 1, 2, \dots$. При этом при $k = 1$ $dx_k = OL$, т. е.:

$$dx_k = |b_k - a_k|. \quad (2.14)$$

Предположили, что каждый из полученных интервалов может содержать вершину шероховатости, возникающую в процессе перемещения деталей относительно друг друга. Тогда ввели обозначения ξ_i и ξ_j .

Пусть $\xi_i, \xi_j \in \{x_k\}$, где $\{x_k\}$ – множество точек на оси Ox , расположенных в пределах рассматриваемой базы. На рисунке 2.2 отобразили графики функций $y = f_3(x)$ и $y = f_4(x)$, которые аппроксимируют функции $y = f_1(x)$ и $y = f_2(x)$ на каждом из интервалов $[x_i; x_{i+1}]$ (или в других обозначениях – $[\xi_i; \xi_{i+1}]$).

Функции $y = f_3(x)$ и $y = f_4(x)$ представляют собой семейство отрезков:

$$y = f_3(x) = \begin{cases} f_{3_1}, [\xi_0; \xi_1]; \\ f_{3_n}, [\xi_{n-1}; \xi_n]; \end{cases} \quad (2.15)$$

$$y = f_4(x) = \begin{cases} f_{4_1}, [\xi_0; \xi_1]; \\ f_{4_n}, [\xi_{n-1}; \xi_n]. \end{cases} \quad (2.16)$$

Рассмотренные координаты ξ_i и ξ_j были представлены как случайные величины, при этом вершины выступов шероховатости имели координаты $T_i(\xi_i; y_i)$ и $T_j(\xi_j; y_j)$. Тогда длину базы обозначили как $|\xi_0L|$.

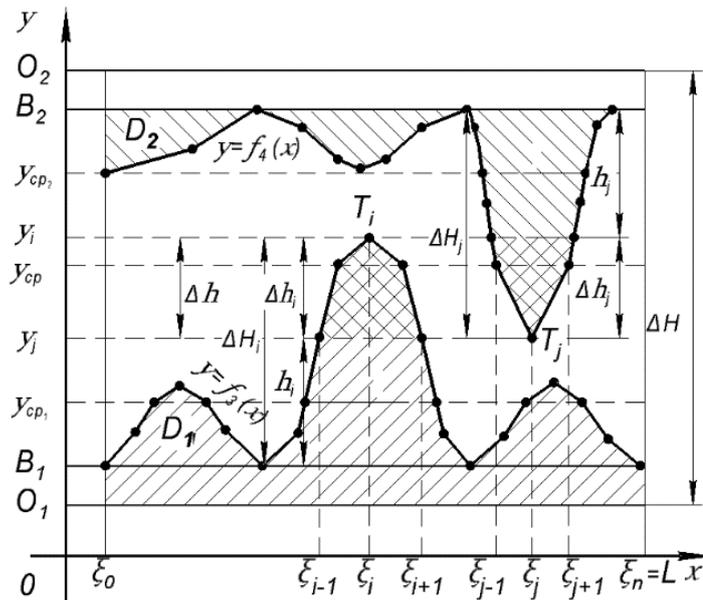


Рисунок 2.2 – Схема контакта трущихся поверхностей деталей на плоскости при переходе от координат x_i к случайным величинам ξ_i

В данном случае случайные величины стали носить дискретный характер и стало возможным говорить о наличии окрестности для каждой величины ξ_i или ξ_j . Обозначили окрестность дискретной случайной величины ξ_i как $O(\xi_i)$, а окрестность для дискретной случайной величины ξ_j – как $O(\xi_j)$.

На рисунке 2.2 построили многоугольники распределения случайных величин ξ_i и ξ_j , предварительно записав их законы распределения, которые стали задавать в виде таблиц, содержащих значения этих случайных величин, т. е. фактически их координаты по оси Ox и их соответствующие вероятности p_i и p_j .

Для координат ξ_i и ξ_j можно говорить о вероятности попадания каждой из них в соответствующий интервал $[a_k; b_k]$, если выполняется равенство:

$$P_k(\xi_k \in [a_k; b_k]) = \frac{\text{mes}([a_k; b_k])}{\text{mes}(OL)} = \frac{|[a_k; b_k]|}{|OL|}, \quad (2.17)$$

где P_k – вероятность попадания величины ξ_k в интервал $[a_k; b_k]$, при этом $a_k \in \{a_i; a_j\}$; $b_k \in \{b_i; b_j\}$; $\xi_k \in \{\xi_i; \xi_j\}$;

$\text{mes}([a_k; b_k])$ – мера (длина) произвольного интервала $[a_k; b_k]$;

$\text{mes}(OL)$ – мера (длина) базы $|OL|$.

Пусть $\Delta\xi_{k+1} = |b_k - \xi_k|$ или $\Delta\xi_{k-1} = |a_k + \xi_k|$, т. е.:

$$\Delta \xi_{i+1} = |b_i - \xi_i| \text{ или } \Delta \xi_{i-1} = |a_i + \xi_i|; \quad (2.18)$$

$$\Delta \xi_{j+1} = |b_j - \xi_j| \text{ или } \Delta \xi_{j-1} = |a_j + \xi_j|. \quad (2.19)$$

Рассматривая координаты ξ_i , ξ_j и ξ_k как дискретные случайные величины с вероятностями p_i , p_j и p_k , записали законы их распределения (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Законы распределения случайных величин при трении шероховатых поверхностей

Для ξ_k						
ξ	ξ_1	ξ_2	...	ξ_k	...	ξ_n
P	p_1	p_2	...	p_k	...	p_n
Для ξ_i						
ξ	ξ_1	ξ_2	...	ξ_i	...	ξ_n
P	p_1	p_2	...	p_i	...	p_n
Для ξ_j						
ξ	ξ_1	ξ_2	...	ξ_j	...	ξ_n
P	p_1	p_2	...	p_j	...	p_n

Задавая закон распределения дискретных случайных величин, нашли их числовые характеристики.

Математическое ожидание μ_ξ (или среднее значение):

$$\mu_\xi = \sum_{k=1}^n \xi_k p_k = \xi_1 p_1 + \xi_2 p_2 + \dots + \xi_k p_k + \dots + \xi_n p_n. \quad (2.20)$$

Для каждой из случайных величин формула (2.20) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \mu_{\xi_i} &= \sum_{i=1}^n \xi_i p_i = \xi_1 p_1 + \xi_2 p_2 + \dots + \xi_i p_i + \dots + \xi_n p_n; \\ \mu_{\xi_j} &= \sum_{j=1}^n \xi_j p_j = \xi_1 p_1 + \xi_2 p_2 + \dots + \xi_j p_j + \dots + \xi_n p_n. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Дисперсию σ_ξ^2 (или меру рассеивания значений случайной величины относительно ее математического ожидания) записали в следующем виде:

$$\sigma_\xi^2 = \mu \left[\xi_k - \mu(\xi_k) \right]^2, \quad (2.22)$$

или в случае наличия случайных величин ξ_i и ξ_j :

$$\sigma_\xi^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i p_j (\xi_i + \xi_j)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i p_j (\xi_i - \xi_j)^2. \quad (2.23)$$

Для более полного описания процесса контактирования трущихся поверхностей в связи с появлением новых точек соприкосновения деталей перешли к ис-

пользованию ξ_i и ξ_j как непрерывных случайных величин. При этом ранее рассматриваемые случайные величины ξ_i , ξ_j и введенная величина ξ_k содержат некоторую окрестность O_r :

$$r = |x_k - a_k| = |b_k - x_k|, \quad (2.24)$$

где r – радиус окрестности.

Тогда, используя интегральную функцию распределения для произвольных случайных величин, лежащих на базе $|\xi_0 L|$, получим:

$$P(\xi_k < \xi < \xi_{k+1}) = F(\xi_k + \Delta\xi_k) - F(\xi_k) = \Delta F(\xi_k), \quad (2.25)$$

где $F(\xi_k)$ – интегральная функция распределения непрерывной случайной величины ξ_k .

Для вычисления числовых характеристик непрерывных случайных величин ξ_k введем функцию плотности распределения $\varphi(\xi_k)$:

$$\varphi(\xi_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\xi_k - \mu_k)^2}{2\sigma_k^2}}. \quad (2.26)$$

Для установления закона распределения непрерывных случайных величин ξ_k рассмотрим связь интегральной и дифференциальной функций распределения:

$$\lim_{\Delta\xi \rightarrow 0} \frac{F(\xi + \Delta\xi) - F(\xi)}{\Delta\xi} = F'(\xi). \quad (2.27)$$

В свою очередь,

$$\varphi(\xi) = F'(\xi). \quad (2.28)$$

Тогда вероятность попадания случайной величины ξ_k в интервал $[a_k; b_k]$:

$$P_i(\xi_i \in [a_i; b_i]) = \int_{a_i}^{b_i} \varphi(\xi_i) d\xi_i \text{ и } P_j(\xi_j \in [a_j; b_j]) = \int_{a_j}^{b_j} \varphi(\xi_j) d\xi_j, \quad (2.29)$$

где $P_k(\xi_k \in [a_k; b_k])$ – вероятность возникновения выступа шероховатости на некотором интервале, расположенном на $|x_0 L|$ (k – принимает значение i или j);

$\varphi(\xi_k)$ – функция плотности распределения вероятностей;

μ_k – математическое ожидание;

σ_k – среднее квадратичное отклонение.

Для уточнения связи между вероятностью случайной величины ξ_k , её интегральной $F(\xi_k)$ и дифференциальной $\varphi(\xi_k)$ функциями распределения рассмотрен случай, когда:

$$F(\xi_k) < P(\xi_k < b_k); \quad (2.30)$$

$$F(\xi_k) = \int_{-\infty}^{\xi_k} \varphi(\xi_k) d\xi_k. \quad (2.31)$$

Отсюда:

$$\varphi(\xi_k) = \lim_{(b_k - \xi_k) \rightarrow 0} \frac{F(\xi_k + (b_k - \xi_k)) - F(\xi_k)}{b_k - \xi_k}. \quad (2.32)$$

Тогда:

$$F(\xi_k) = \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi_k} e^{-\frac{(\xi_k - \mu_k)^2}{2\sigma_k^2}} d\xi_k. \quad (2.33)$$

График функции нормального распределения для случайной величины ξ_k показан на рисунке 2.3.

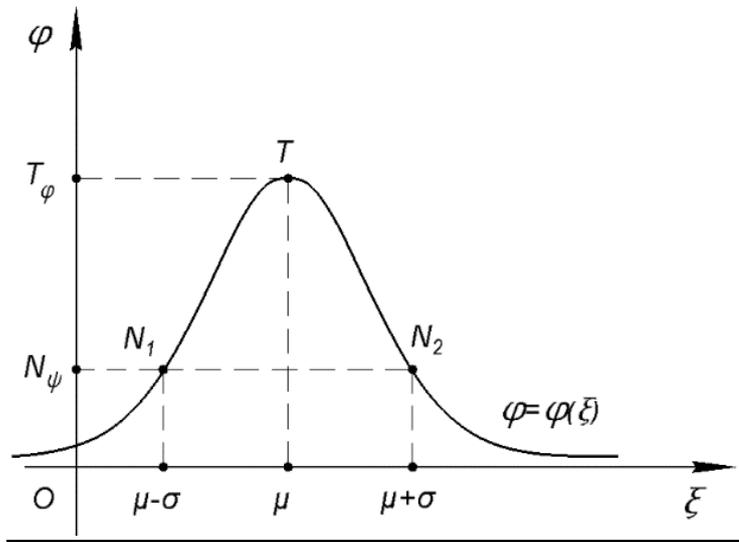


Рисунок 2.3 – График функции нормального распределения случайной величины ξ_k при контактировании шероховатых поверхностей

Кривая $\varphi(\xi)$ достигает максимума в точке $T(\mu; T_\varphi)$, при этом координата

$$T_\varphi = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}.$$

Точки перегиба N_1 и N_2 получили соответственно координаты $(\mu - \sigma; N_\psi)$ и $(\mu + \sigma; N_\psi)$, где $N_\psi = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi e}}$, что свидетельствует о наличии нормального закона

распределения случайной величины ξ и, следовательно, о наличии выступа шероховатости.

Таким образом, наибольшее значение функции плотности распределения случайной величины ξ_k :

$$\varphi_{\max}(\xi_k) = \varphi(\psi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}. \quad (2.34)$$

Числовые характеристики случайной величины ξ_k определяли по следующим формулам:

$$\mu(\xi_k) = \int_{a_k}^{b_k} \xi_k P(\xi_k) d\xi_k; \quad (2.35)$$

$$\sigma^2(\xi_k) = \int_{a_k}^{b_k} [\xi_k - \mu(\xi_k)]^2 P(\xi_k) d\xi_k; \quad (2.36)$$

$$\sigma(\xi_k) = \sqrt{\sigma^2(\xi_k)}. \quad (2.37)$$

Тогда, совмещая формулы (2.34)–(2.37), определяющие числовые характеристики, можно записать функцию плотности распределения случайной величины следующим образом:

$$\varphi_{\max}(\xi_k) = \varphi(\psi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} = \frac{1}{\sqrt{\sigma^2(\xi_k)2\pi}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi \int_{a_k}^{b_k} [\xi_k - \mu(\xi_k)]^2 P(\xi_k) d\xi_k}}. \quad (2.38)$$

После вычисления функций плотности распределения случайных величин был сделан вывод о наличии новых точек соприкосновения трущихся поверхностей.

Для более точного описания процесса износа поверхностей деталей при столкновении выступов шероховатости в пределах базы $|OL|$ рассмотрим частный случай для $n = 2$ с произвольными вершинами T_i и T_j , возникающих с вероятностями P_i и P_j . Случайные величины $\xi_i \in [a_i; b_i]$, $\xi_j \in [a_j; b_j]$.

При этом функции плотности вероятностей распределения случайных величин будут иметь вид:

$$\varphi(\xi_i) = \frac{1}{\sigma_i\sqrt{2\pi}} e^{\alpha}; \varphi(\xi_j) = \frac{1}{\sigma_j\sqrt{2\pi}} e^{\beta}, \quad (2.39)$$

где

$$\alpha = -\frac{(\xi_i - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}; \quad (2.40)$$

$$\beta = -\frac{(\xi_j - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}, \quad (2.41)$$

μ_i, μ_j – const;

σ_i, σ_j – средние квадратичные отклонения;

σ_i^2, σ_j^2 – дисперсии.

Была установлена функциональная связь износа деталей и значения функции плотности вероятностей распределения случайных величин:

$$I = I(\varphi(\xi_k)). \quad (2.42)$$

Формулы (2.39) и (2.42) позволили сделать вывод о зависимости износа I от значений функций плотности вероятностей случайных величин, соотнесенных с существующими выступами шероховатостей трущихся деталей $\xi_k \in \{\xi_i; \xi_j\}$, так как с увеличением значения функции плотности вероятности распределения случайных величин возрастает вероятность возникновения новых вершин шероховатости. Это явление сделало возможным использовать выражение (2.42) при прогнозировании износостойкости деталей за счет уменьшения шероховатости их поверхностей.

Пусть $P(T_i; T_j)$ – вероятность возникновения новых вершин шероховатости, тогда в зависимости от значения изменения вероятности $\Delta P(A_i; A)$ можно делать вывод о наличии контакта между парой выступов шероховатости с вершинами в точках T_i и T_j :

- если $0 < \Delta P(T_i; T_j) < 1$, то взаимодействие выступов шероховатости возможно;
- если $\Delta P(T_i; T_j) = 1$, то взаимодействие выступов произошло и можно говорить о наличии износа деталей;
- если $\Delta P(T_i; T_j) = 0$, то взаимодействия выступов не было, следовательно, износ деталей отсутствует.

Введем величины h_i и h_j как высоты выступов шероховатости.

Рассмотрим износ I как случайное событие, а вероятность наличия износа свяжем с изменением вероятности возникновения новых вершин шероховатости:

$$\Delta P(T_i; T_j) = P(I). \quad (2.43)$$

Вероятность износа равна произведению вероятностей следующих событий:

1-е событие: $\Delta h_i < y_{cp}$;

2-е событие: $\Delta h_j > y_{cp}$;

3-е событие, являющееся суммой первых двух событий ($\Delta h_i < y_{cp}$), ($\Delta h_j > y_{cp}$) и события A , которое заключается в наличии выступов шероховатости на рассматриваемых интервалах $[a_i; b_i]$ и $[a_j; b_j]$, т. е.

$$P(I) = (P(\Delta h_i < y_{cp}) \cup P(\Delta h_j > y_{cp})) \cap P(A). \quad (2.44)$$

При отсутствии изменения высот Δh_k имеем, что 1-е и 2-е события являются невозможными – $P(\Delta h_i < y_{cp}) = 0$ и $P(\Delta h_j > y_{cp}) = 0$. Следовательно:

$$P(\Delta h_i < y_{cp}) \cup P(\Delta h_j > y_{cp}) = 0.$$

Тогда $P(I) = 0$, т. е. износ деталей отсутствует.

Если же $P(I) = (P(\Delta h_i < y_{cp}) \cup P(\Delta h_j > y_{cp})) \cap P(A)$, то события ($\Delta h_i < y_{cp}$) и ($\Delta h_j > y_{cp}$) являются несовместными. Следовательно:

$$(P((\Delta h_i < y_{cp}) \cup (\Delta h_j > y_{cp})) = P(\Delta h_i < y_{cp}) \cup P(\Delta h_j > y_{cp}).$$

В свою очередь, события $((\Delta h_i < y_{cp}) \cup (\Delta h_j > y_{cp}))$ и событие A являются независимыми, следовательно:

$$P(((\Delta h_i < y_{cp}) \cup (\Delta h_j > y_{cp})) \cap A) = P((\Delta h_i < y_{cp}) \cup (\Delta h_j > y_{cp})) \cap P(A).$$

Поскольку на практике установить точный вид графика функций $f_{i_k}(x)$ и $f_{j_k}(x)$ не всегда представляется возможным, то было сделано предположение о том, что при их аппроксимации к линейным функциям можно получить решение поставленной задачи оценки наличия износа трущихся деталей.

Для обоснования этого предположения ввели обозначение R как решение систем уравнений (2.12) или (2.13), тогда $P(R)$ – вероятность совместности этих систем.

Так как

$$P(I) = P(R), \quad (2.45)$$

т. е. вероятность наличия износа равна вероятности наличия решения системы уравнений (2.13), или:

$$P(I) = P(R) = P(\Delta h_i > 0) \cdot P(\Delta h_j < 0). \quad (2.46)$$

Если $P(R) = 1$, то это свидетельствует о достоверности наличия совместности систем уравнений (2.12) и (2.13). Тогда можно сделать вывод о существовании износа трущихся деталей – $P(I) = 1$.

Было сделано предположение, что высоты h_i и h_j также можно рассматривать как непрерывные случайные величины, отвечающие своим свойствам, имеющие интегральные функции $F(\Delta h_i)$ и $F(\Delta h_j)$, а также функции распределения $\varphi(\Delta h_i)$ и $\varphi(\Delta h_j)$.

Одним из методов снижения шероховатости поверхностей трения и износа деталей является использование смазочных материалов с различными компонентами, заполняющими впадины шероховатостей и поверхностных дефектов трущихся деталей машин.

Был рассмотрен вариант изменения рельефа поверхности трения деталей машин в процессе их эксплуатации за счет добавления в смазочную среду ультрадисперсной порошкообразной добавки.

Так как при движении деталей относительно друг друга часть материала срежется (произойдет износ), то графики функций $y = f_1(x)$ и $y = f_2(x)$ (см. рисунок 2.1) преобразуются в графики функций $y = f_3(x)$ и $y = f_4(x)$ (рисунок 2.4).

Для более реалистичного представления о процессе износа в результате трения поверхностей двух деталей на рисунке 2.5 представили его изображение в трехмерном пространстве $XOYZ$.

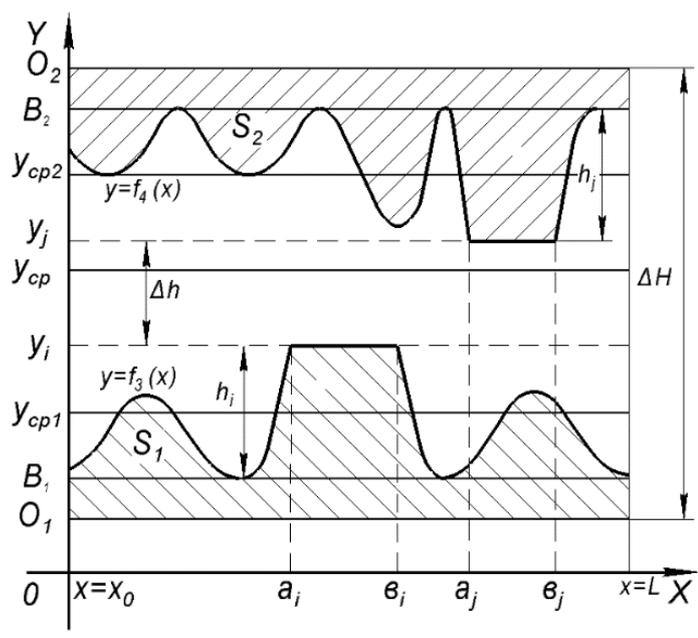


Рисунок 2.4 – Схема контакта трущихся поверхностей деталей после появления износа

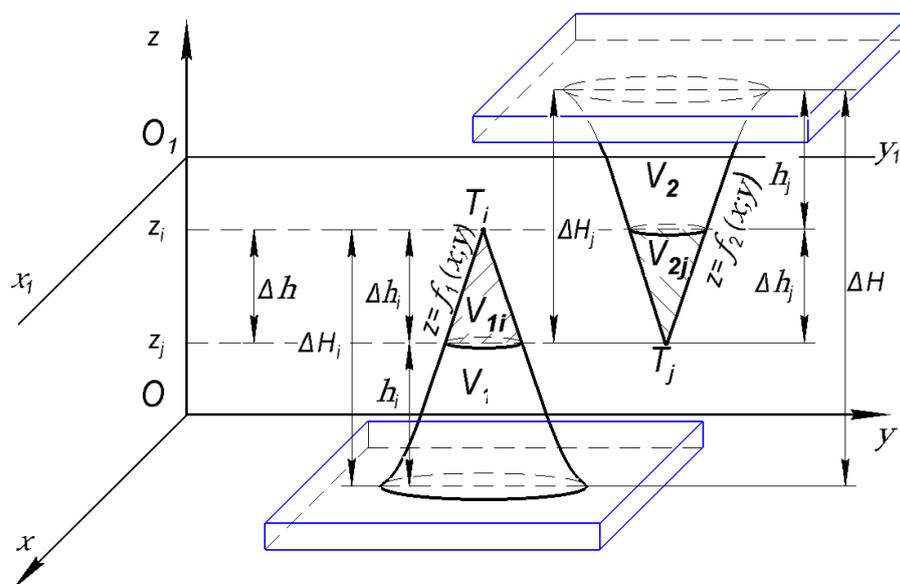


Рисунок 2.5 – Схема контакта взаимодействующих поверхностей деталей в трехмерном пространстве

База одной детали была расположена в плоскости XOY , а другой – в плоскости $X_1O_1Y_1$. Выступы шероховатости описаны функциями $z = f_1(x; y)$, $z = f_2(x; y)$ и имеют вершины в точках $T_i(x_i; y_i; z_i)$ и $T_j(x_j; y_j; z_j)$.

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

$$\Delta h = z_i - z_j. \quad (2.47)$$

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

$$I = I(\Delta h; m). \quad (2.48)$$

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.

Для вычисления величин износа трущихся деталей использовали следующие показатели и обозначения:

m_{1i} – масса срезаемой части i -го выступа шероховатости, кг;

m_{2j} – масса срезаемой части j -го выступа шероховатости, кг;

n – количество выступов шероховатости;

ρ – плотность материала деталей, кг/м³;

$x_{i_1}, y_{i_1}, z_{i_1}, x_{j_1}; y_{j_1}; z_{j_1}$ – координаты точек, принадлежащие базе $|x_0L|$, определяющие вершины шероховатости;

$x_{i_2}, y_{i_2}, z_{i_2}, x_{j_2}; y_{j_2}; z_{j_2}$ – координаты точек, соответствующих максимумам функций $y = f_1(x)$ и $y = f_2(x)$, описывающих шероховатость поверхностей деталей, имеющих базу $|x_0L|$;

dx, dy, dz – изменение координат вершин шероховатости T_i и T_j в процессе износа.

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

$$m_{1,2j} = m_{1i} + m_{2j}, \quad (2.49)$$

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

Из полученной формулы (2.49) были рассмотрены введенные слагаемые:

$$m_{1i} = \rho \int \int \int_{x_{i_1} y_{i_1} z_{i_1}}^{x_{i_2} y_{i_2} z_{i_2}} dx dy dz; \quad (2.50)$$

$$m_{2_j} = \rho \int \int \int_{x_{j_1} y_{j_1} z_{j_1}}^{x_{j_2} y_{j_2} z_{j_2}} dx dy dz. \quad (2.51)$$

Тогда, объемы V_{1_i} и V_{2_j} срезаемых частей вершин шероховатости деталей во время их контакта можно определить следующим образом:

$$V_{1_i} = \int \int \int_{x_{i_1} y_{i_1} z_{i_1}}^{x_{i_2} y_{i_2} z_{i_2}} dx dy dz; V_{2_j} = \int \int \int_{x_{j_1} y_{j_1} z_{j_1}}^{x_{j_2} y_{j_2} z_{j_2}} dx dy dz, \quad (2.52)$$

т. е.

$$m_{1_i 2_j} = \rho (V_{1_i} + V_{2_j}), \quad (2.53)$$

или в развернутом виде:

$$m_{1_i 2_j} = \rho \left(\int \int \int_{x_{i_1} y_{i_1} z_{i_1}}^{x_{i_2} y_{i_2} z_{i_2}} dx dy dz + \int \int \int_{x_{j_1} y_{j_1} z_{j_1}}^{x_{j_2} y_{j_2} z_{j_2}} dx dy dz \right). \quad (2.54)$$

Так как на протяженности базы $|x_0 L|$ расположена совокупность вершин шероховатости $\bigcup_{i=1}^n A_i$ и $\bigcup_{j=1}^r A_j$ (см. рисунок 2.1), то формула, позволяющая подсчитать массу всех вершин шероховатостей, следующая:

$$\sum_{j=1}^{n,r} m_{1_i 2_j} = \rho \sum_{j=1}^{n,r} \left(\int \int \int_{x_{i_1} y_{i_1} z_{i_1}}^{x_{i_2} y_{i_2} z_{i_2}} dx dy dz + \int \int \int_{x_{j_1} y_{j_1} z_{j_1}}^{x_{j_2} y_{j_2} z_{j_2}} dx dy dz \right). \quad (2.55)$$

Для сокращения написания формул было предложено вместо 2 деталей i -й и j -й рассмотреть произвольный выборочный вариант с обозначением k .

В дальнейшем рассматривали элементы деталей с параметрами:

t – время, ч;

$L_{k\alpha}$ – длина основания рассматриваемого участка детали, м;

$L_{k\beta}$ – ширина (толщина) основания рассматриваемого участка детали, которая в течение всего эксперимента оставалась неизменной, м;

$L_{k\alpha 1}$ – длина участка k -й детали, на котором износ отсутствует, м;

$L_{k\alpha 2}$ – длина участка k -й детали, подвергшегося износу, м;

$L_{k\gamma 1}$ – толщина (высота) k -й детали без учета высот вершин шероховатости, м;

$L_{k\gamma 2}$ – толщина (высота) участка k -й детали при существующем износе, м;

$L_{k\gamma}$ – высота (толщина) k -й детали участка без износа с учетом высоты вершин шероховатости, м;

$\Delta L_{k\gamma}$ – разность высот (толщины) для k -й детали между высотой (толщиной) участка без износа и высотой (толщиной) участка при износе, м;

$L_{k\gamma3}$ – разность высот исследуемой части детали после того, как произошел износ, м;

ΔH_{k1} – высота вершин шероховатости k -й детали на участке без износа, м;

ΔH_{k2} – высота вершин шероховатости k -й детали на участке с износом, м;

$S_{k\alpha\times\beta}$ – площадь рассматриваемого участка k -й детали, м²;

$S_{k\alpha1\times\beta}$ – площадь рассматриваемого участка k -й детали по длине базы $L_{k\alpha1}$, м²;

$S_{k\alpha2\times\beta}$ – площадь рассматриваемого участка k -й детали по длине базы $L_{k\alpha2}$, м²;

$T_{k1}(x_{k1}, y_{k1}, z_{k1})$ – обозначение произвольной вершины шероховатости с ее координатами части детали до проведения эксперимента на площади $S_{k\alpha\times\beta}$;

$T_{k2}(x_{k2}, y_{k2}, z_{k2})$ – обозначение произвольного минимума шероховатости с его координатами в части детали на площади $S_{k\alpha\times\beta}$ до проведения эксперимента;

$T_{k3}(x_{k3}, y_{k3}, z_{k3})$ – обозначение произвольной вершины шероховатости с ее координатами в части детали, где произошел износ, после проведения эксперимента на площади $S_{k\alpha2\times\beta}$;

$T_{k4}(x_{k4}, y_{k4}, z_{k4})$ – обозначение произвольного минимума шероховатости с его координатами на той части детали, где произошел износ после проведения эксперимента на площади $S_{k\alpha2\times\beta}$;

$V_{k\Delta H}$ – совокупный объем вершин шероховатости по длине базы $L_{k\alpha}$, мм³;

$V_{k\Delta H1}$ – совокупный объем вершин шероховатости по длине базы $L_{k\alpha1}$, мм³;

$V_{k\Delta H2}$ – совокупный объем вершин шероховатости по длине базы $L_{k\alpha2}$, мм³;

$V_{k\alpha}$ – объем исследуемой части детали, соответствующей длине базы $L_{k\alpha}$ без учета объема вершин шероховатости, мм³;

$V_{k\alpha1}$ – объем исследуемой части детали, соответствующей длине базы $L_{k\alpha1}$ без учета объема вершин шероховатости, мм³;

$V_{k\alpha 2}$ – объём исследуемой части детали, соответствующей длине базы $L_{k\alpha 2}$ без учета объема вершин шероховатости, мм³;

$V_{k\gamma}$ – объём исследуемой части детали до того, как произошел износ, мм³;

$V_{k\gamma 3}$ – объём исследуемой части детали после того, как произошел износ, мм³;

V_{Δ} – объём изношенной части детали, мм³;

$M_{k\gamma}$ – масса исследуемой части детали до того, как произошел износ, г;

$M_{k\gamma 3}$ – масса исследуемой части детали после того, как произошел износ, г;

M_{Δ} – масса исследуемой части детали, которая изнашивалась в процессе трения, г;

I – износ детали, г;

И – интенсивность изнашивания детали, г/ч.

Используя рисунок 2.6 и учитывая, что ширина детали $L_{k\beta}$ в процессе эксперимента оставалась постоянной, были получены следующие соотношения:

- разность высот после износа:

$$L_{k\gamma 3} = L_{k\gamma} - \Delta L_{k\gamma}; \quad (2.56)$$

- площадь рассматриваемого участка k -й детали:

$$S_{k\alpha \times \beta} = S_{k\alpha} L_{k\beta}; \quad (2.57)$$

- площадь рассматриваемого участка k -й детали по длине базы $L_{k\alpha 1}$:

$$S_{k\alpha 1 \times \beta} = S_{k\alpha 1} L_{k\beta}; \quad (2.58)$$

- площадь рассматриваемого участка k -й детали по длине базы $L_{k\alpha 2}$:

$$S_{k\alpha 2 \times \beta} = S_{k\alpha 2} L_{k\beta}. \quad (2.59)$$

При этом площадь основания рассматриваемой части детали определили следующим образом:

$$S_{k\alpha \times \beta} = S_{k\alpha 1 \times \beta} + S_{k\alpha 2 \times \beta}. \quad (2.60)$$

Далее были получены формулы с учетом ранее введенных обозначений.

Высоту части детали с учетом вершин шероховатости по базе $L_{k\alpha}$ рассчитали как сумму двух составляющих:

$$L_{k\gamma} = L_{k\gamma 1} + \Delta H_{k1}. \quad (2.61)$$

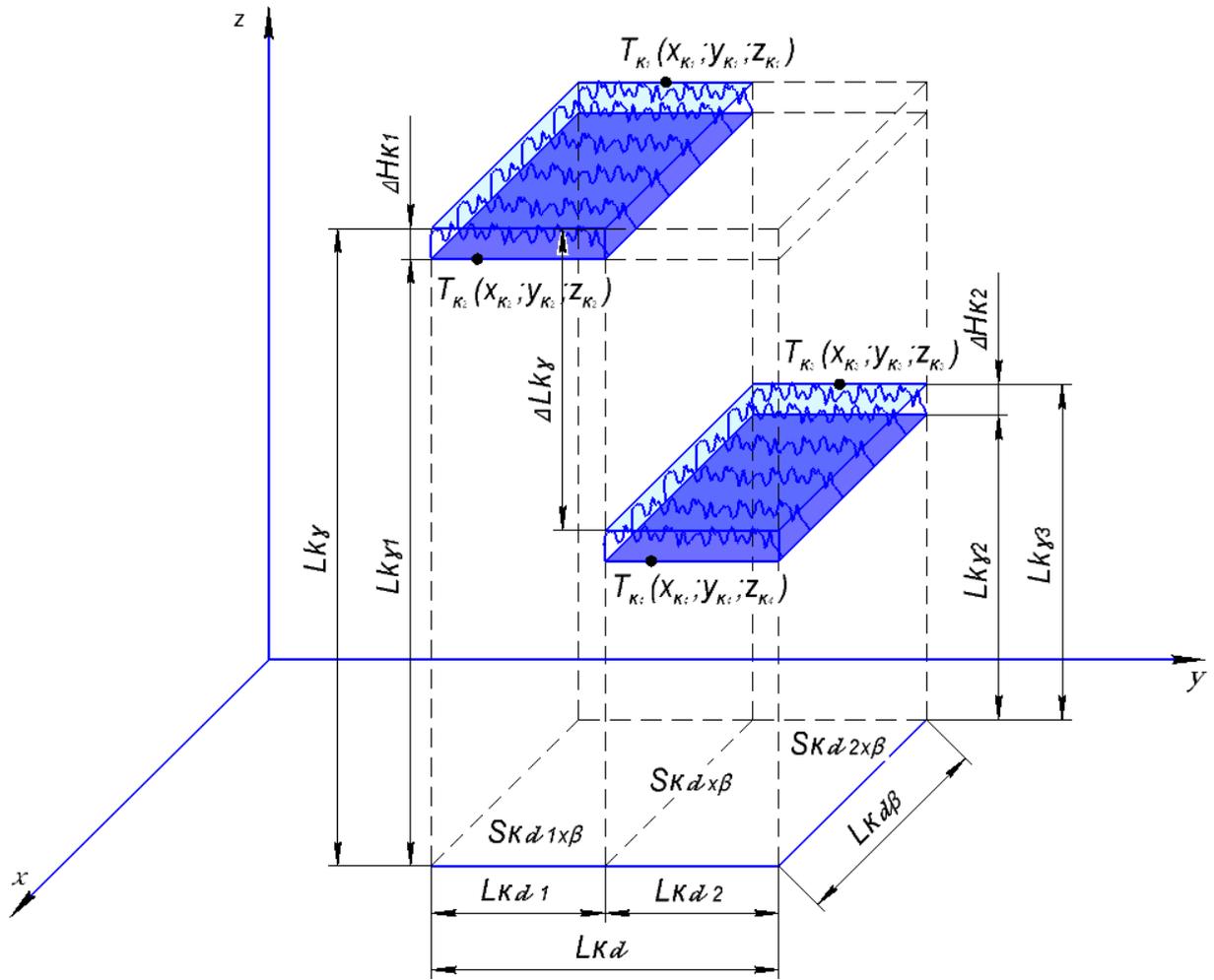


Рисунок 2.6 – Схема, демонстрирующая износ части детали (модельного образца) после трибологических испытаний

Высота части детали с учетом вершин шероховатости по базе $L_{k\alpha 1}$ совпадала с высотой по базе $L_{k\alpha}$:

$$L_{k\gamma 1} = L_{k\gamma} - \Delta H_{k1}. \quad (2.62)$$

Так как по длине $L_{k\alpha}$ износа не было или он был незначительным, то его величиной можно пренебречь.

Объем части детали до возникновения износа был рассчитан по формуле:

$$V_{k\gamma} = V_{k\alpha} + V_{k\Delta H1} + V_{k\Delta H2}, \quad (2.63)$$

ИЛИ

$$V_{k\gamma} = L_{k\alpha} L_{k\beta} L_{k\gamma 1} + \sum_{k=1}^n \iiint_{x_{k1} y_{k1} z_{k1 - \Delta H_{k1}}}^{x_{k1} y_{k1} z_{k1}} dx dy dz. \quad (2.64)$$

Объём вершин шероховатости по всей площади $S_{k\alpha \times \beta}$ вычисляли по формуле:

$$V_{k\Delta H} = \sum_{k=1}^n \iiint_{x_{k1} y_{k1} z_{k1}}^{x_{k2} y_{k2} z_{k2}} dx dy dz. \quad (2.65)$$

Масса детали до появления износа:

$$M_{k\gamma} = \rho V_{k\gamma}, \quad (2.66)$$

т. е.

$$M_{k\gamma} = \rho \left(L_{k\alpha} L_{k\beta} L_{k\gamma 1} + \sum_{k=1}^n \iiint_{x_{k1} y_{k1} z_{k1}}^{x_{k2} y_{k2} z_{k2}} dx dy dz \right). \quad (2.67)$$

После проведения эксперимента изменение высоты части детали в процессе износа заключалось в изменениях координат точек, соответствующих вершинам T_{k1} и минимумам T_{k2} шероховатости вдоль оси Oz на T_{k3} и T_{k4} :

$$\Delta H_{k1} = z_{k2} - z_{k1}; \quad (2.68)$$

$$\Delta H_{k2} = z_{k3} - z_{k4}. \quad (2.69)$$

Величина изношенной части детали с учетом вершин шероховатости по базе $L_{k\alpha 2}$:

$$L_{k\gamma 3} = L_{k\gamma 2} + \Delta H_{k2}. \quad (2.70)$$

Тогда изменение высот до эксперимента и после него с учетом износа выглядит следующим образом:

$$\Delta L_{k\gamma} = L_{k\gamma 1} - L_{k\gamma 2}. \quad (2.71)$$

При этом объём детали уменьшился, так как на участке базы $L_{k\alpha 2}$ произошёл износ и размер изношенной части детали $L_{k\gamma 3}$:

$$L_{k\gamma 3} = L_{k\gamma} - \Delta L_{k\gamma}, \quad (2.72)$$

где

$$L_{k\gamma 3} = L_{k\gamma 2} + \Delta H_{k2}, \quad (2.73)$$

а

$$\Delta H_{k2} = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k3}}^{z_{k4}} dz. \quad (2.74)$$

Тогда объём детали $V_{k\gamma3}$, оставшийся после износа:

$$V_{k\gamma3} = V_{k\gamma} - V_{\Delta}. \quad (2.75)$$

Так как

$$V_{\Delta} = S_{k\alpha2 \times \beta} \Delta L_{k\gamma} - \sum_{k=1}^n \iiint_{x_{k3} y_{k3} z_{k3}}^{x_{k4} y_{k4} z_{k4}} dx dy dz, \quad (2.76)$$

то

$$V_{k\gamma3} = L_{k\alpha} L_{k\beta} L_{k\gamma} + \sum_{k=1}^n \iiint_{x_{k1} y_{k1} z_{k1}}^{x_{k2} y_{k2} z_{k2}} dx dy dz - \left(S_{k\alpha2 \times \beta} \Delta L_{k\gamma} + \sum_{k=1}^n \iiint_{x_{k1} y_{k1} z_{k1}}^{x_{k2} y_{k2} z_{k2}} dx dy dz \right). \quad (2.77)$$

В связи с тем, что первоначальная масса детали $M_{k\gamma}$ уменьшилась, то массу изношенной части детали на участке длиной $L_{k\alpha1}$ за время t определяли по формуле:

$$M_{k\gamma3} = M_{k\gamma} - \rho \left(L_{k\alpha} L_{k\beta} L_{k\gamma1} + \sum_{k=1}^n \iiint_{x_{k1} y_{k1} z_{k1}}^{x_{k2} y_{k2} z_{k2}} dx dy dz + \left(S_{k\alpha2 \times \beta} \Delta L_{k\gamma} + \sum_{k=1}^n \iiint_{x_{k3} y_{k3} z_{k3}}^{x_{k4} y_{k4} z_{k4}} dx dy dz \right) \right). \quad (2.78)$$

Разница масс ΔM части детали до и после эксперимента:

$$\Delta M = M_{k\gamma} - M_{k\gamma3}. \quad (2.79)$$

Подсчитав разницу масс $M_{k\gamma}$ и $M_{k\gamma3}$, определили износ I детали:

$$I = I(\Delta M) = \rho \Delta V. \quad (2.80)$$

В свою очередь, скорость изнашивания И:

$$И = \frac{\rho V_{\Delta}}{t}. \quad (2.81)$$

После уточнения составляющих формула (2.81) приняла вид:

$$И = \frac{\rho V_{\Delta}}{t} = \frac{\rho \left(S_{k\alpha2 \times \beta} \Delta L_{k\gamma} + \sum_{k=1}^n \iiint_{x_{k3} y_{k3} z_{k3}}^{x_{k4} y_{k4} z_{k4}} dx dy dz \right)}{t}. \quad (2.82)$$

Был проведен эксперимент с целью проверки полученных формул (2.80) и (2.82) и определения сходимости теоретических и экспериментальных данных.

2.2 Обоснование состава ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу

Как отмечалось ранее, износостойкость трущихся деталей определяется свойствами поверхностных пленок, формирующихся под действием окружающих факторов и, особенно, свойствами смазочной среды.

Для создания поверхностных пленок с необходимыми трибологическими свойствами широко используют порошкообразные добавки к смазочным материалам. Одним из наиболее эффективных способом получения мелкодисперсных порошков является метод плазменной перекомденсации исходного сырья.

Полученные таким образом частицы имеют следующие параметры: размер – 0,01...0,05 мкм, площадь удельной поверхности – 100...150 м²/г. Частицы имеют сферическую форму и высокую химическую активность.

В ходе проведенных работ были синтезированы следующие классы порошков:

- а) чистые – Cu, Zn, Ni, MoS₂, Al, BN;
- б) бинарные – Cu-Zn, Cu-Ni, Cu-Sn, Cu-Pb;
- в) легированные – Cu-Zn-P, Cu-Zn-S, Cu-Ni-P, Cu-Ni-S, Cu-Sn-P, Cu-Sn-S, Cu-Pb-P, Cu-Pb-S;
- г) композиционные – Cu-Al₂O₃, Cu-BN, Cu-MoS₂.

Отдельные компоненты в комбинированных добавках выполняют разные функции: высокопрочная составляющая обеспечивает необходимую механическую прочность, а пластичная часть способствуют образованию защитных пленок на трущихся поверхностях.

Особое место среди рекомендуемых порошков занимают медь и ее сплавы, так как они позволяют создавать условия для работы пар трения в режиме избирательного переноса. Это явление было обнаружено в 1956 г. Д. Н. Гаркуновым и И. В. Крагельским [30, 32, 59].

Поверхностная металлическая пленка, полученная в результате данного эффекта, приводит к созданию систем автокомпенсации неравновесных процессов изнашивания и к снижению трения. «Несмотря на то, что избирательный перенос был открыт при трении пары «сталь – бронза» в среде глицерина, медьсодержащие добавки к смазочным средам обеспечивают этот эффект и в парах трения черных металлов. В обоих случаях на поверхностях трения образуется сервовитная пленка активного металла, одинаково улучшающая триботехнические свойства сопряжения. В качестве элементов, помогающих меди и ее сплавам реализовать эффект «безызносности», как правило, выбирают следующие: S, P, F, O и др. Кроме того, медь и ее сплавы, обладая высокой пластичностью, способствуют интенсивному формированию поверхностной пленки за счет заполнения впадин шероховатости и дефектов» [135].

Использование фосфора в качестве легирующего элемента основано на его способности образовывать с металлами относительно легкоплавкие эвтектики, повышающие жидкотекучесть и адгезионную связь с металлом [145]. Кроме того, фосфор улучшает прирабатываемость и гетерогенность структуры поверхностной пленки.

В свою очередь, сера способствует снижению коэффициента трения. Так, например, коэффициент трения железа с содержанием фосфора 0,5–1,0 % и серы 0,9–1,0 % в условиях граничного трения равен 0,008...0,02, сухого – 0,18...0,33 [73].

Кроме того, фосфор добавляют в сплавы на основе меди для улучшения их механических и антифрикционных свойств. Он интенсифицирует процесс диффузии олова и цинка в медь, позволяя получать прочный сплав.

С целью дополнительного улучшения антифрикционных свойств разрабатываемой ремонтно-эксплуатационной добавки к маслу предлагается использовать ультрадисперсный порошок полтитаната калия, представляющий собой неорганический полимер слоистой структуры и обладающий низким значением коэффициента трения при высокой подвижности структурных слоев [108, 147].

Полтитанат калия представляет собой частицы ультрадисперсного диапазона (200–1000 нм) и наноразмерной толщины (50–80 нм). Он легко поддается раз-

личным способам модификации, позволяющим использовать его одновременно в качестве антифрикционной добавки и носителя для других видов присадок и, что дает возможность регулировать трибологические и эксплуатационные характеристики смазочного материала в зависимости от его назначения и условий эксплуатации [86, 138].

Основной проблемой при использовании в качестве добавки к смазочным материалам ультра- и наноразмерных порошкообразных материалов является их склонность к укрупнению, поскольку они обладают повышенной поверхностной энергией. Придать стабильность дисперсной системе можно путем применения поверхностно-активных веществ. Необходимо обеспечить создание вокруг каждой частицы порошка слоя макромолекул для образования насыщенного монослоя или полислоя.

Стабильность дисперсной системы при добавлении в нее ПАВ зависит от степени взаимодействия стабилизатора, в качестве которого выступает ПАВ, с поверхностью мелкодисперсного порошка частиц. При сближении мелкодисперсных частиц между ними действуют силы притяжения (Ван-дер-Ваальсовы силы), а при более плотном сближении частицы порошка, покрытые ПАВ будут, отталкиваться друг от друга. Для того чтобы это происходило, необходимо, чтобы физико-химические свойства стабилизатора были идентичны с со свойствами основной жидкости для обеспечения однородности при их тепловом передвижении. В связи с этим в качестве стабилизатора мы предлагаем использовать олеиновую кислоту $C_{17}H_{33}COOH$ с длиной молекул 2 нм [1, 116].

Для стабильности системы «мелкодисперсная частица – стабилизатор – окружающая среда» необходимо рациональное соотношение частиц и ПАВ, которое должно способствовать полному покрытию поверхности каждой мелкодисперсной частицы слоем стабилизатора [58, 16].

Соотношение по массе мелкодисперсной частицы и стабилизатора можно определить по формуле [22]:

$$k = \frac{\rho_m d_s^3}{\rho_n [(d_s + 2\delta)^3 - d_s^3]}, \quad (2.83)$$

где ρ_m – плотность частиц дисперсной системы;

d_s – диаметр частиц;

ρ_n – плотность стабилизатора;

δ – толщина оболочки стабилизатора.

В результате расчета получили $k = 3,3$. Таким образом, для обеспечения устойчивости коллоидной системы «мелкодисперсная частица – стабилизатор» их соотношение должно быть 3:1. Данная концентрация стабилизатора в смазочной композиции является минимальной, потому что позволяет лишь создать монослой молекул олеиновой кислоты вокруг мелкодисперсных частиц порошка.

Для уточнения концентрации олеиновой кислоты в предлагаемой смазочной композиции необходимо проведение дополнительных экспериментов.

«Оптимизацию состава разрабатываемой ультра- и наноконпозиционной добавки к моторному маслу осуществляли в ходе многократных длительных трибологических испытаний. Для снижения затрат труда и времени использовали методику проведения полного факторного эксперимента.

Исследуемые процессы наиболее полно характеризуются износом деталей модельной пары трения по массе, мг. Принятый параметр преобразовывали в значения на безразмерной шкале, используя линейное уравнение:

$$y'_{yi} = b_0 + b_1 y_{yi}, \quad (2.84)$$

где b_0, b_1 – коэффициенты;

y_{yi} – частный именованный параметр оптимизации.

Значения параметра y' на кодированной шкале изменялись от 0 до +4. Коэффициенты b_0 и b_1 находили из условия, что нижнее значение частного параметра оптимизации y соответствует начальному значению желательности. Второй точкой является значение частного параметра, соответствующее наивысшей желательности с точки зрения технической возможности достижения оптимального результата. Таким образом, получили следующую систему» [4]:

$$\begin{cases} y' = 0; y = 10 \text{ мг;} \\ y' = +4; y = 0,1 \text{ мг,} \end{cases} \quad (2.85)$$

где y' – значение параметра оптимизации на кодированной шкале;

y – значение параметра оптимизации в натуральных единицах измерения.

Подставив принятые значения в выражение (2.85) и решив систему уравнений (2.85), нашли значения коэффициентов b_0 и b_1 : $b_0 = 4$; $b_1 = -0,4$. С помощью этих коэффициентов и формулы (2.85) натуральные значения принятого параметра, полученные при проведении эксперимента, пересчитали в кодированные.

Предварительный эксперимент, характеристика которого представлена в таблице 2.2, показал, что противоизносные свойства разрабатываемой смазочной композиции зависят от нескольких независимых переменных: x_1 – содержание ультраразмерного порошка (УРП) полититаната калия (ПТК), г/4 л; x_2 – содержание наноразмерного порошка (НРП) латуни, г/4 л; x_3 – содержание ПАВ.

Таблица 2.2 – Характеристика плана эксперимента

Фактор	Уровень варьирования факторов			Интервал варьирования
	нижний	основной	верхний	
x_1	1,00	2,25	3,50	1,25
x_2	1,80	4,40	7,00	2,60
x_3	0,50	1,25	2,00	0,75

Количество опытов факторного планирования определяли из выражения $2^3 = 8$. Анализ информации, полученной об объекте исследования в результате проведения предварительного эксперимента (таблица 2.3), позволил установить, что оптимальное значение обобщенной функции желательности получено при проведении 2-го опыта.

Таблица 2.3 – Матрица планирования и результаты эксперимента

№ опыта	x_1	x_2	x_3	y'_{i}
1	2	3	4	5
1	1	1,8	0,5	12,8
2	3,5	1,8	0,5	32,8
3	1	7	0,5	10,0
4	3,5	7,0	0,5	6,8
5	1,0	1,8	2,0	21,2
6	3,5	1,8	2,0	25,6
7	1,0	7,0	2,0	7,6
8	3,5	7,0	2,0	6,0

«Метод полного факторного эксперимента даёт возможность построить экспериментально-статистическую модель исследуемых процессов в некоторой локальной области факторного пространства, лежащей в окрестности выбранной точки с координатами $(x_{0_1}, x_{0_2}, \dots, x_{0_n})$. В нашем случае была поставлена задача математического описания процессов трения и износа в локальной области факторного пространства, лежащей в окрестности точки с координатами (1; 2; 4; 25). Для этого начало координат факторного пространства переносили в указанную точку путём ввода новых переменных:

$$X_j = \frac{x_j - x_{j_0}}{\Delta x_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n), \quad (2.87)$$

где X_j – кодированный фактор;

x_j – именованное значение фактора;

j – номер фактора;

n – количество факторов;

Δx_j – масштаб по оси X_j (интервал варьирования именованного фактора).

После построения модели полного факторного эксперимента (ПФЭ) при проверке адекватности математической модели по критерию Фишера, определили, что ПФЭ нам не подходит, так как расчетный критерий Фишера больше теоретического при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Для получения наиболее точной информации о свойствах названного объекта исследований, а также представления этой информации в компактной и удобной форме с количественной оценкой точности использовали центральное композиционное ротатабельное планирование эксперимента (ЦКРП) (матрица плана и результаты представлены в приложении 4). Этот метод планирования эксперимента позволяет получить более точное математическое описание свойств за счёт увеличения количества опытов N :

$$N = N_1 + N_2 + N_3, \quad (2.88)$$

где N_1 – число опытов факторного планирования, $N_1 = 2^n$;

N_2 – число опытов в звёздных точках, $N_2 = 2n$;

N_3 – число опытов в центре плана.

В нашем случае $n = 3$; $\alpha = 1,68$; $N_3 = 6$; $N = 20$ (см. приложение 4).

В ходе анализа результатов эксперимента устанавливали характер зависимости $y'_p = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$. Для решения большинства задач трения и износа в тех случаях, когда не известно аналитическое выражение функции отклика, можно рассматривать не саму функцию, а ее разложение, например, в степенной ряд Тейлора» [4]:

$$y'_p = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n + \beta_{12} X_1 X_2 + \dots + \beta_{n-1} X_n X_{n-1} + \\ + \beta_{11} X_1^2 + \dots + \beta_{nn} X_n^2 + \dots, \quad (2.89)$$

где y'_p – отклик функции с кодированными факторами;

β – коэффициент регрессии;

X – кодированный фактор;

n – число факторов.

С учётом исследуемых свойств смазочной композиции и числа влияющих факторов выражение (2.90) принимает вид:

$$y'_p = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \\ + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2. \quad (2.90)$$

«Коэффициенты регрессии искомого уравнения определяют в результате обработки экспериментальных данных. Следовательно, они несут на себе отпечаток погрешностей эксперимента. Для того, чтобы подчеркнуть это обстоятельство, заменим в уравнении (2.90) символы β , обозначающие истинные значения коэффициентов, на символы b , подразумевая значения коэффициентов, полученные экспериментально-расчётным путём. Таким образом, математическое описание исследуемых процессов осуществляли, используя результаты полного факторного эксперимента, проведённого в соответствии с центральным композиционным ротатбельным планом в виде уравнения» [4]:

$$y_p = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + \\ + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2. \quad (2.91)$$

Коэффициенты регрессии вычисляли на основании результатов центрального композиционного ротатбельного плана эксперимента (см. приложение 5):

$$\begin{array}{ll}
 b_0 = 27,6166; & b_{13} = -1,8667; \\
 b_1 = 14,2889; & b_{23} = -0,2821; \\
 b_2 = 14,2084; & b_{11} = -1,15; \\
 b_3 = -7,3287; & b_{22} = 1,6187; \\
 b_{12} = -1,1231; & b_{33} = 4,9542.
 \end{array}$$

«После подстановки значимых коэффициентов в формулу (2.91) получили следующую экспериментально-статистическую модель трибологических свойств смазочной композиции» [4]:

$$\begin{aligned}
 y_p = & 27,6166 + 14,2889X_1 + 14,2084X_2 - 7,3287X_3 - 1,1231X_1X_2 - \\
 & - 1,8667X_1X_3 - 0,2821X_2X_3 - 1,15X_1^2 + 1,6187X_2^2 + 4,9542X_3^2. \quad (2.92)
 \end{aligned}$$

где y_p – расчётное значение функции отклика, полученное при переходе в выражении (2.103) от кодированных факторов к именованным [4].

«Для получения смазочной композиции с наилучшими трибологическими свойствами выполнили оптимизацию её состава. Так как в качестве критерия оптимизации выбрали 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» (2.92) [4]. 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. Координаты экстремальной точки определили в результате решения системы уравнений:

$$\left. \begin{array}{l}
 \frac{\partial y_p}{\partial x_1} = 0; \\
 \frac{\partial y_p}{\partial x_2} = 0; \\
 \frac{\partial y_p}{\partial x_3} = 0.
 \end{array} \right\} \quad (2.93)$$

Решив систему уравнений (2.93), получили координаты экстремума (1,08; 4,26; 0,85) (приложение 6).

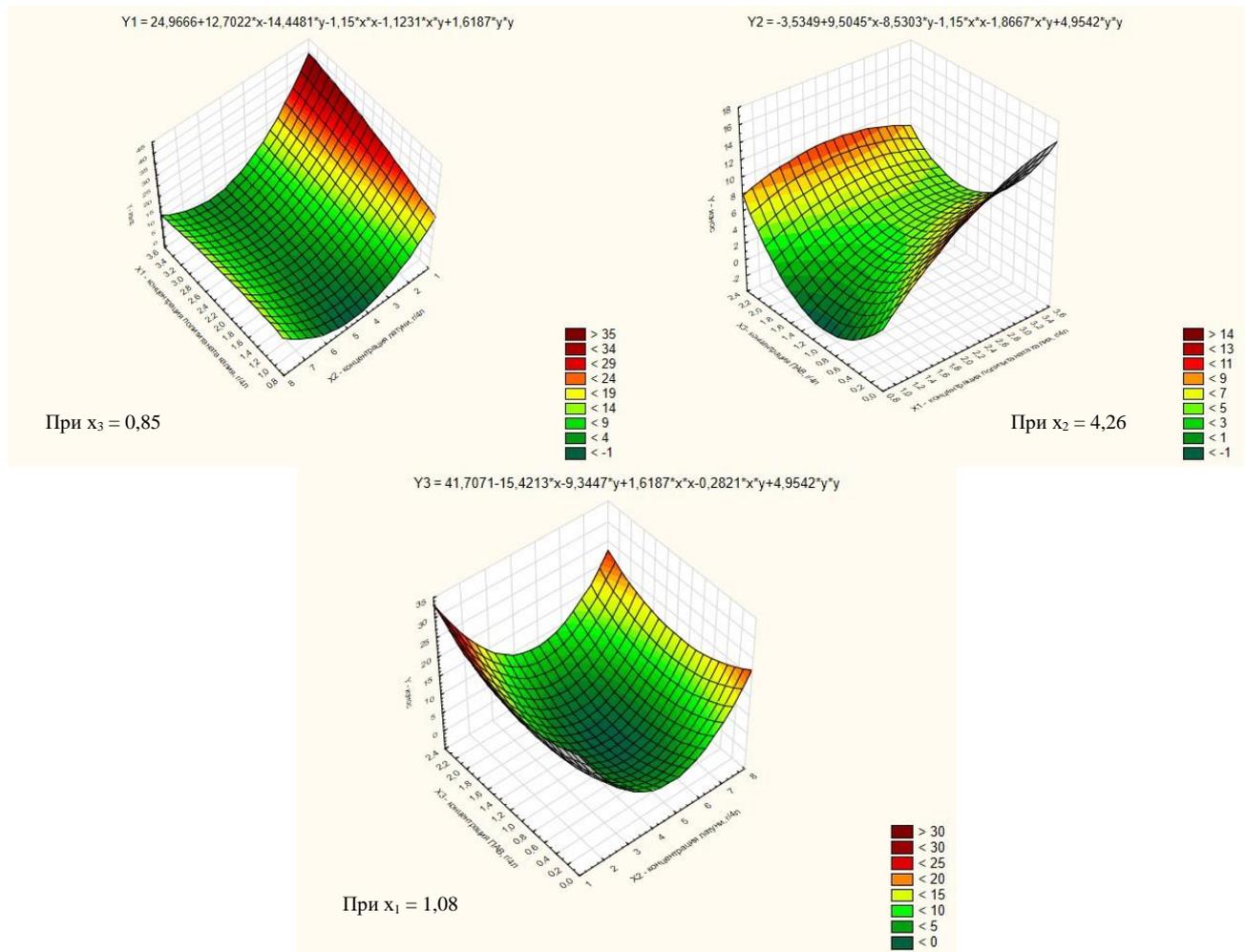


Рисунок 2.7 – График функции отклика

Для наглядности и дальнейшего анализа исследуемых процессов уравнение регрессии (2.103) представили графически в виде поверхности отклика (рисунок 2.7). «При числе факторов, большем или равном трем, графическая интерпретация функции отклика возможна при использовании двух факторов и фиксации остальных на поверхностных уровнях. В нашем случае представлена функция отклика при фиксированном значении концентрации добавки в составе смазочной композиции» [4]. Дифференцирование, решение системы уравнений (2.93) и построение поверхности отклика выполнили с помощью автоматизированной системы математических вычислений Statistica [4, 74]. Расчёты представлены в приложениях 5 и 6.

2.3 Оценка влияния предлагаемой смазочной композиции на ресурс трибосопряжения

Эффективность предлагаемой ремонтно-эксплуатационной добавки оценивали по ее влиянию на износ трущихся деталей по теоретическому прогнозированию увеличения их ресурса по сравнению с товарным моторным маслом Лукойл 15W-40.

Износ детали и ресурс сопряжения можно проиллюстрировать, используя классическую кривую (рисунок 2.8).

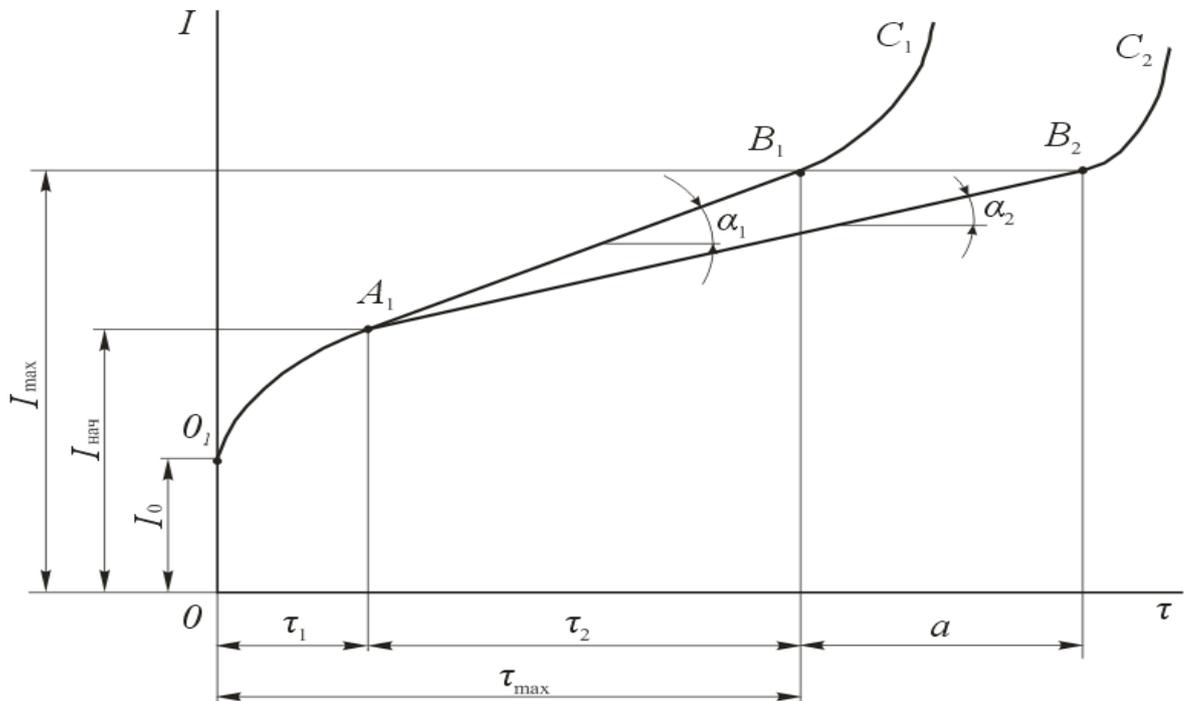


Рисунок 2.8 – Увеличение ресурса трибосопряжения в зависимости от интенсивности изнашивания деталей в период эксплуатации: τ_1 – период приработки трущейся пары; τ_2 – период нормальной работы сопряжения (участок кривой AB)

Учитывая, что продолжительность периода τ_2 ограничена достижением максимального износа I_{\max} , повысить ресурс трибосопряжения можно лишь путем снижения интенсивности изнашивания в период нормальной эксплуатации, представляющей собой угол наклона кривой износа $\text{tg } \alpha$.

Если после сборки сопряженная пара деталей имела минимальный зазор I_0 , который в результате начального износа увеличивался до величины $I_{\text{нач}}$, то за период эксплуатации величина зазора достигала своего максимального значения I_{\max} .

Из рисунка 2.8 следует, что ресурс деталей τ_{\max} :

$$\tau_{\max} = \tau_1 + \tau_2. \quad (2.94)$$

Так как увеличение износа в период эксплуатации идет по прямой AB , то

$$I_{\max} - I_{\text{нач}} = \tau_2 \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.95)$$

откуда

$$\tau_2 = \frac{I_{\max} - I_{\text{нач}}}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.96)$$

Поэтому

$$\tau_{\max} = \tau_1 + \frac{I_{\max} - I_{\text{нач}}}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.97)$$

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

Таким образом, разработка и применение при эксплуатации автотранспортной техники мероприятий, направленных на снижение интенсивности изнашивания деталей сопряжения, а следовательно на уменьшение угла наклона прямой AB , позволят переместить точку B_1 вправо до положения B_2 и тем самым увеличить период эксплуатации на величину отрезка a .

2.4 Выводы по главе

1. Построена математическая модель процесса изнашивания трущихся деталей (2.80), учитывающая изменения параметров состояния их поверхностных слоев под действием различных смазочных композиций. Установлено влияние ремонтно-эксплуатационной добавки к смазочной среде на интенсивность изнашивания контактирующих деталей (формула (2.82)), которое заключается в увеличении ресурса этих деталей.

2. Обоснован предварительный качественный состав ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу, включающий в себя наноразмерный порошок легированного сплава меди с цинком, ультрадисперсный порошок полититаната калия и ПАВ.

3. Разработана методика проведения полнофакторного планирования эксперимента с целью получения математической модели процесса изнашивания трущихся деталей в присутствии разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки, а также решена задача оптимизации ее количественного состава.

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Общая программа исследований

В соответствии с целью работы и поставленными задачами была принята следующая программа исследований:

1. Осуществить анализ условий работы двигателей автотранспортных средств и установить основные причины, влияющие на снижение надежности их основных сопряжений и деталей.

2. Провести обзор существующих присадок и добавок к моторным маслам, обеспечивающих снижение интенсивности изнашивания трущихся деталей и увеличение ресурса двигателя в условиях эксплуатации.

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

4. Обосновать состав и определить оптимальную концентрацию основных компонентов смазочной композиции, содержащей эксплуатационно-восстановительную добавку на основе ультра- и нанодисперсных порошкообразных материалов, а также провести ее сравнительные лабораторные испытания с базовым моторным маслом.

5. Исследовать поверхности трения деталей, сформированных под действием разработанной смазочной композиции, и определить химический состав поверхностной пленки, полученной за счет предлагаемой ремонтно-эксплуатационной добавки.

6. Провести сравнительные стендовые испытания разработанной смазочной композиции, содержащей эксплуатационно-восстановительную добавку на основе ультра- и нанодисперсных порошкообразных материалов и базового моторного масла Лукойл 15W-40.

7. Провести эксплуатационные испытания разработанной смазочной композиции и дать технико-экономическую оценку ее эффективности.

Обоснование состава и оптимальной концентрации ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу осуществляли на основании анализа результатов сравнительных трибологических лабораторных испытаний, выпол-

ненных на машине трения СМЦ-2 по схеме «ролик-колодка» и с помощью метода полнофакторного планирования эксперимента.

Физико-химические свойства поверхностной пленки, сформированной под действием разработанной добавки к моторному маслу, исследовали с помощью стандартного оборудования согласно частным методикам и методикам, изложенным в ГОСТах, представленным в соответствующих разделах.

Стендовые испытания двигателей КАМАЗ-7403.10 на базовом моторном масле Лукойл 15W-40 и на масле с разработанной ремонтно-эксплуатационной добавкой проводили на базе лаборатории испытания двигателей ОАО «КАМАЗ-Дизель» (г. Набережные Челны, Республика Татарстан) согласно ГОСТ 14846-88 «Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний» и разработанной программе-методике стендовых испытаний.

Испытания экспериментальных двигателей осуществляли на стенде фирмы AVL с гидротормозом фирмы SCHENCK.

Производственные испытания автомобилей КАМАЗ-55111, укомплектованных двигателями КАМАЗ-7403.10, работающих на базовом моторном масле Лукойл 15W-40 и на масле с разработанной ремонтно-эксплуатационной добавкой, проводили в хозяйствах Саратовской области в соответствии с планом наблюдений *NuT* (ГОСТ 27.410-87).

3.2 Общие методические подходы к получению ультра- и наноразмерных порошкообразных металлов

Анализ существующих технологий получения НРП металлов и их соединений позволил выделить метод плазменной переконденсации, основанный на испарении крупнодисперсного порошка или прутка необходимого металла (сырья) в плазменном потоке температурой 6000...8000 К и конденсации пара до частиц требуемого размера [112]. Достоинством данного метода является возможность не только получать НРП чистых металлов и сплавов, но и производить их легирование различными элементами на одной стадии.

Внешний вид и принципиальная схема установки для получения НРП металлов представлены на рисунках 3.1 и 3.2.

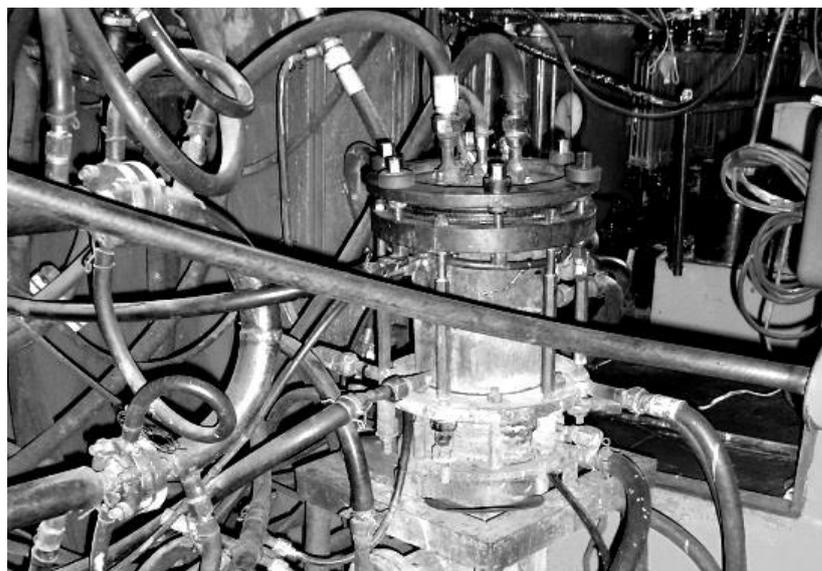


Рисунок 3.1 – Внешний вид установки для получения наноразмерных порошков металлов и их соединений

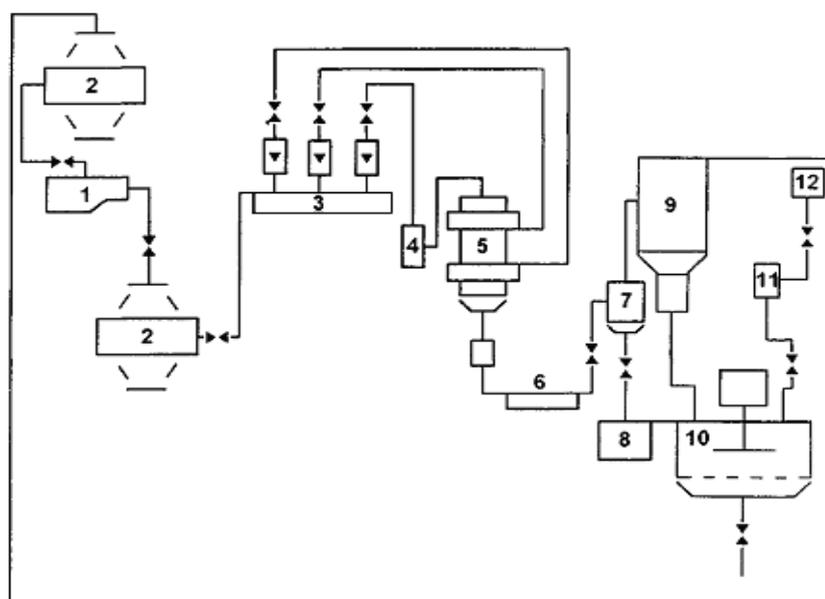


Рисунок 3.2 – Схема установки для получения НРП металлов и их соединений: 1 – компрессор; 2 – ресивер; 3 – газовая рампа; 4 – дозатор; 5 – плазматрон; 6 – холодильник; 7 – классификатор; 8 – бункер; 9 – фильтр; 10 – реактор; 11 – дозатор жидкости; 12 – ёмкость для углеводородной жидкости [5]

В схеме использован замкнутый газовый цикл. Циркуляцию инертного газа (аргона) осуществляют с помощью компрессора 1 (см. рисунок 3.2). Компрессированный газ (до 2 кг/см^2) через ресивер 2 поступает на рампу 3 ротаметров, через которую он распределяется по узлам схемы. Главным аппаратом-реактором является электродуговой плазматрон 5 линейной конструкции типа ЭДП-104, к которому присоединены реактор 10 и холодильник 6.

Процесс переконденсации осуществляется следующим образом. Порошкообразное сырье из дозатора 4 газовым потоком подается в плазматрон 5, где происходят испарение сырья и конденсация пара до частиц требуемого размера. Аэрозоль, содержащий мелкодисперсный порошок, охлаждается в холодильнике 6. Крупные частицы, в том числе частицы переработанного сырья, отделяются от НРП в классификаторе 7 инерционного типа, после чего часть порошка попадает в бункер 8. Окончательное отделение НРП от транспортировочного газа происходит в рукавном фильтре 9, а очищенный газ через ресивер 2 снова поступает в компрессор 1. По мере накопления НРП в фильтре 9 его выгружают в специальную тару. Пирофорность порошка устраняется в реакторе 10. Жидкий углеводород подаётся из ёмкости 12 через дозатор 11.

Представленным способом были получены следующие классы порошков: чистые, бинарные, легированные и композиционные. Их частицы имели форму, близкую к сферической [112], и следующие параметры: размер частиц – 10...50 нм, удельная площадь поверхности – 100...150 м²/г.

«Имея широкую номенклатуру порошков, можно создавать различные составы добавок к смазочным материалам с учетом адсорбционных, хемосорбционных и трибохимических процессов, протекающих в зонах трения, обеспечивать требуемые трибологические характеристики рабочих поверхностей деталей машин в результате формирования на поверхностях трения функциональных пленок, обеспечивающих высокую надежность работы трущихся деталей» [4].

3.3 Методика получения ультрадисперсных порошков полититаната калия

В основу метода получения ультрадисперсных порошков (УДП) полититанатов калия положен синтез, основанный на взаимодействии порошка оксида титана с расплавами системы KNO_3 -KOH [138].

Реагенты, используемые в качестве сырьевых материалов, приведены в таблице 3.1, а состав реакционной смеси – в таблице 3.2.

Таблица 3.1 – Реагенты для синтеза УДП полититаната калия

Реактив	Чистота, %	Производитель
Оксид титана (TiO ₂), порошок	93,0	ОАО «СУМЫХИМПРОМ»
Нитрат калия (KNO ₃), порошок, ГОСТ 19790-74	99,97	ОАО «Азот» (г. Березняки)
Гидроксид калия (KOH), плоские гранулы, ГОСТ 9285-78	96,2	ОАО «Сода-Хлорат» (г. Березняки)

Таблица 3.2 – Состав реакционной смеси и температура обжига при синтезе УДП полититаната калия

Обозначение продукта	Сырьевой компонент, %			Температура обработки, °С
	TiO ₂	KNO ₃	KOH	
ПТК	30	40	30	550

Сырьевые смеси приготавливали с использованием электронных лабораторных весов (ГОСТ 29329-92), а затем их гомогенизировали в дробилке в эмалированной ёмкости в течение 30 мин. Полученные смеси в поддоне из нержавеющей стали помещали в камерную лабораторную электропечь ПК 200-125 (ТУ 3442-004-42296670-00), нагревали до соответствующей температуры (см. таблицу 3.2) со скоростью 10 °С/мин и обрабатывали при данной температуре в течение 1 ч, после чего охлаждали печь со скоростью 5 °С/мин. При достижении температуры 250 °С поддон с продуктом взаимодействия компонентов реакционной смеси извлекали из печи и охлаждали на воздухе. Охлажденный продукт помещали в контейнер из эмалированной стали, оснащенный перемешивающим устройством, заливали дистиллированной водой при соотношении по массе вода / продукт 10 : 1. Перемешивание осуществляли в течение 1 ч. При этом происходило растворение непрореагировавшей части нитрата и гидроксида калия в воде. «По окончании процесса отмывки, после остановки перемешивающего устройства и седиментации отмытого продукта на дно контейнера проводили декантирование образовавшегося водного раствора, а осадок вновь заливали водой при том же соотношении. Далее включали перемешивающее устройство и перемешивали еще в течение 1 ч. На втором этапе промывки из полученного порошка удаляли остатки водорастворимых компонентов. После остановки мешалки и седиментации полу-

ченных порошков полититаната калия снова осуществляли декантацию водного раствора, а пастообразный остаток просушивали в сушильном шкафу СНОП-5.2,5/2 в течение 3 ч при температуре 40 °С. После просушивания продукт, представлявший собой кусковой твердый материал, измельчали в порошок с помощью шаровой мельницы МШМП-06» [138].

Учитывая, что полученные частицы порошка полититаната калия обычно представляют собой агломераты более мелких частиц, с целью их диспергирования проводили обработку водными растворами различных ПАВ. Для этого были выбраны три различных типа ПАВ: анионный, неионогенный и катионный, в качестве которых использовали промышленные реактивы (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – ПАВ, использованные для обработки порошка полититанатов калия

ПАВ	Тип	Химический состав
Сульфанол	анионный	Алкилбензолсульфонат натрия
Лаурилсульфат	анионный	Алкилсульфат
ОП-10	неионогенный	Оксиэтилированный алкилфенол
Синтанол (ДС-10)	неионогенный	Оксиэтилированный спирт
СТАВ	катионный	Цетилтриметиламмоний бромид

Результаты проведённых ранее исследований показали, что диспергирующее действие различных неионогенных и катионных ПАВ примерно одинаково. Эффект от использования катионного ПАВ несколько выше, однако с учетом того, что цена таких ПАВ значительно превосходит стоимость неионогенных, при выборе предпочтение отдали ОП-10.

Порошок полититаната калия, полученный после просушки и измельчения, помещали в диспергатор и заливали 0,3%-м водным раствором выбранного ПАВ [26].

С помощью диспергатора агломераты полититаната калия разбивали на частицы меньшего размера, при этом происходила адсорбция молекул ПАВ на поверхности полученных частиц. Экспериментально было установлено, что максимальной степени диспергирования частицы порошка достигали после 3-часовой обработки. По окончании этого времени проводили седиментацию частиц полититаната калия путем введения в суспензию небольшого количества 0,1 Н раствора соляной кислоты. После осуществляли декантацию водного раствора, а полу-

ченный пастообразный продукт помещали в поддон из нержавеющей стали и просушивали в сушильном шкафу в течение 3 ч при температуре 60 °С [138]. После сушки порошок пересыпали в измельчитель и доводили до кондиционного состояния в течение 15 мин.

3.4 Методика приготовления смазочной композиции с использованием ультра- и наноразмерных компонентов

Для приготовления смазочных композиций на основе моторного масла Лукой 15W-40 с использованием ультра- и наноразмерных компонентов использовали специальную установку [132, 137], внешний вид и схема которой представлены на рисунках 3.3 и 3.4.



Рисунок 3.3 – Установка для приготовления добавки

Для повышения седиментационной устойчивости УНПМ в моторном масле проводили их обработку поверхностно-активным веществом – олеиновой кислотой.

Таким образом, экспериментальные смазочные композиции приготавливали с использованием следующих составляющих: нанопорошок сплава меди и цинка (латунь Л60), легированного серой и фосфором, ультраразмерный порошок поли-титаната калия, ПАВ и моторное масло. Выбор перечисленных компонентов обусловлен результатами анализа литературных источников и проведённых предварительных трибологических испытаний [84, 114, 128, 130, 133].

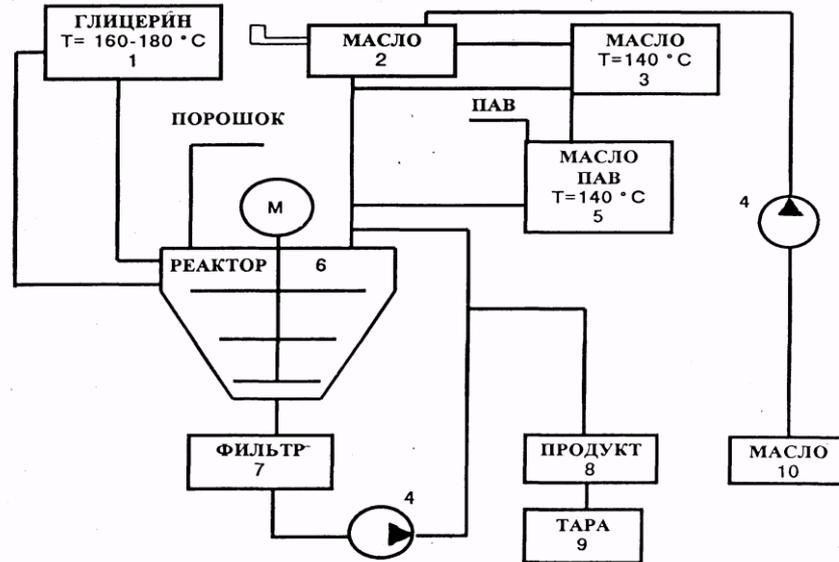


Рисунок 3.4 – Схема установки для приготовления добавки: 1 – емкость с глицерином; 2 – мерная емкость с маслом; 3 – емкость с маслом; 4 – насос; 5 – емкость с ПАВ; 6 – реактор; 7 – фильтр; 8 – емкость для присадки; 9 – тара; 10 – емкость для масла

Технология приготовления смазочной композиции заключалась в следующем. Из емкости 10 с помощью электронасоса 4 моторное масло поступало в мерную емкость 2 с ценой деления 0,5 л. Из нее масло переливали в емкости 5 и 6 и нагревали до температуры 140 °С. Далее включали термостатированную емкость 1, заполненную глицерином, циркулирующим по рубашке реактора 6. Температуру содержимого реактора доводили до 140 °С.

На аналитических весах ДЛР-200М взвешивали необходимое количество ПАВ и сливали в емкость 5, где при температуре 140 °С смесь перемешивали в течение 30 мин. На технических весах типа ВНЦ с ценой деления 5 г взвешивали необходимое количество порошкообразного наполнителя, перемешивали его в определенной пропорции с маслом и заливали в реактор 6. Далее включали перемешивающее устройство реактора и его циркуляционную систему. Содержимое реактора перемешивали в течение 15 мин при температуре 140 °С. После этого в реактор 6 из емкости 5 заливали необходимое количество смеси масла с ПАВ. Полученную многокомпонентную смесь перемешивали в течение 30 мин при температуре 140 °С. Готовую суспензию из реактора 6 в горячем виде с помощью насоса 4 перекачивали в емкость 8, где она охлаждалась до температуры ниже 60 °С, после чего ее сливали в подготовленную тару.

3.5 Методика трибологических испытаний добавок к моторному маслу

Эффективность экспериментальных составов ультра- и нанокomпозиционных добавок оценивали в ходе сравнительных лабораторных испытаний, по результатам которых их трибологические свойства сравнивали между собой и с товарным моторным маслом Лукойл 15W-40.

Трибологические свойства испытуемых составов исследовали с использованием модельной пары трения «ролик – колодка», позволяющей имитировать работу ресурсопределяющего трибосопряжения ДВС «поршневое кольцо – гильза». Схема контактирования трущихся деталей данной пары трения представлена на рисунке 3.5.

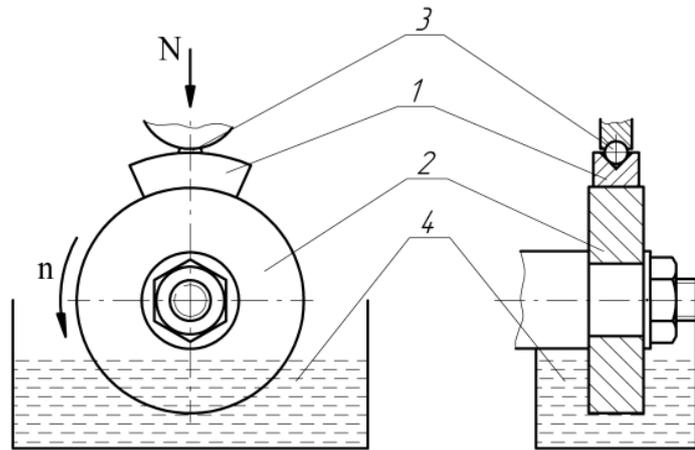


Рисунок 3.5 – Схема контактирования деталей модельной пары трения «ролик – колодка»: 1 – колодка; 2 – ролик; 3 – центрирующий шарик; 4 – резервуар с испытуемым маслом [6]

Элементы модельного трибосопряжения были изготовлены из серого чугуна СЧ-25 (ГОСТ 1412-85) одной плавки. Твердость соответствовала твердости поверхности гильзы цилиндра (190...220 НВ). Наружный диаметр ролика – 50 мм, ширина – 12 мм. Колодки изготавливали из кольца с наружным диаметром 68 мм, внутренний диаметр которого шлифовали под размер ролика. Шероховатость рабочей поверхности ролика и колодки после механической обработки соответствовала 0,32 и 0,63 мкм. Коэффициент взаимного перекрытия образцов – 0,13.

Трибологические испытания проводили на машине трения СМЦ-2 (рисунок 3.6) при следующих режимах: нагрузка 1,5 кН, частота вращения ролика 500 мин⁻¹, продолжительность испытания 3 ч.



Рисунок 3.6 – Внешний вид машины трения СМЦ-2

Перед экспериментами машину трения СМЦ-2 тарировали по нагрузке и моменту трения с использованием динамометра, рычага и тарировочных гирек согласно инструкции по эксплуатации.

«В процессе всех испытаний на нижнем валу машины с помощью специального устройства замеряли и непрерывно регистрировали с одновременной записью на ленте потенциометра КСП2-005 (ГОСТ 7164-71) момент трения (рисунок 3.7). Необходимую частоту вращения ролика устанавливали подбором отношения диаметров шкивов клиноременной передачи» [135]. Температуру поверхности трения ролика фиксировали инфракрасным термометром MS6530.

Перед испытаниями детали модельных трибосопряжений прирабатывали на моторном масле Лукойл 15W-40 в течение 3 ч на испытательных режимах. Смазку образцов осуществляли погружением нижнего ролика на $1/3$ диаметра в смазочную ванну объемом 150 см^3 (см. рисунок 3.5). Нагрузку на ролики увеличивали от 0 до величины испытательной нагрузки ступенчато по 0,25 кН. Продолжительность работы на каждой ступени нагружения составила 0,5 ч. Нагрузку изменяли при помощи нагрузочного устройства, установленного на машине трения. Величину усилия, приходящегося на ролики, определяли по тарировочному графику (рисунок 3.8). Критерием окончания приработки служила стабилизация момента трения при максимальной нагрузке.

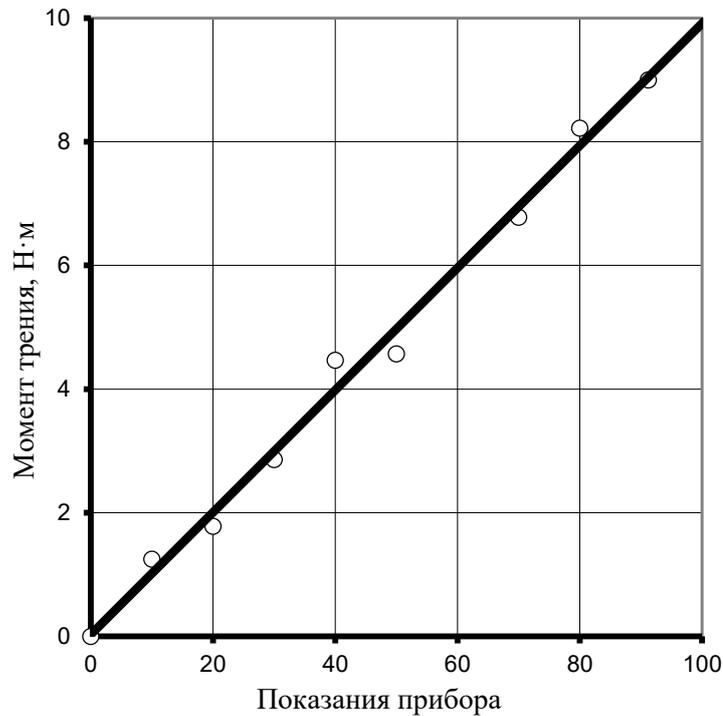


Рисунок 3.7 – Тарировочный график момента трения на машине трения СМЦ-2 для пары трения «ролик – колодка»

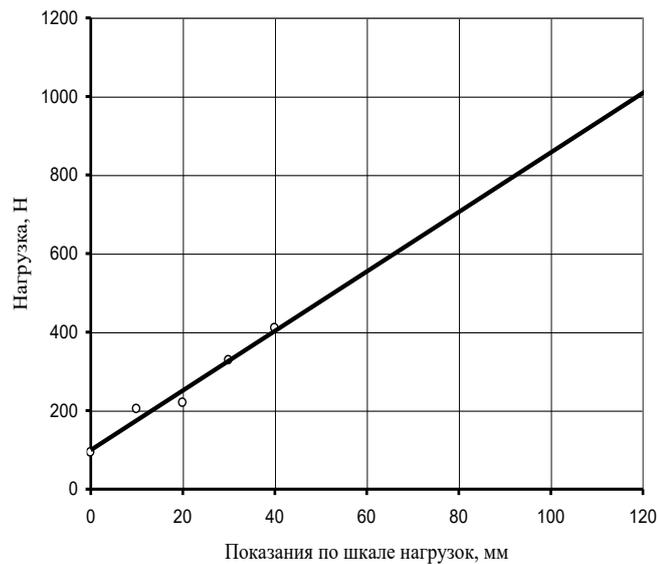


Рисунок 3.8 – Тарировочный график механизма нагружения машины трения СМЦ-2

После окончания приработки детали промывали в бензине-растворителе «Калоша» (ГОСТ 443-76), высушивали на воздухе в течение 24 ч и взвешивали на аналитических весах HR-250 AZG (рисунок 3.9) с точностью до 0,1 мг.

Приработанные элементы модельных трибосопряжений устанавливали на машину трения и проводили испытания исследуемых смазочных материалов. Эффективность разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки оценивали по

значениям момента трения, температуры, возникающих в трибосопряжении «ролик – колодка», и износа роликов.



Рисунок 3.9 – Аналитические весы HR-250 AZG

Трибологические свойства разработанной добавки сравнивали со свойствами базового моторного масла Лукойл 15W-40.

3.6 Методика исследования морфологии поверхностей трения образцов и химического состава поверхностной пленки

Морфологию поверхностей трения образцов после испытания на машине трения СМЦ-2 исследовали с помощью растрового электронного микроскопа MIRA II TESCAN (рисунки 3.10 и 3.11). Определяли характер распределения модификаторов по поверхности трения модельных образцов.



Рисунок 3.10 – Исследовательский комплекс MIRA II TESCAN

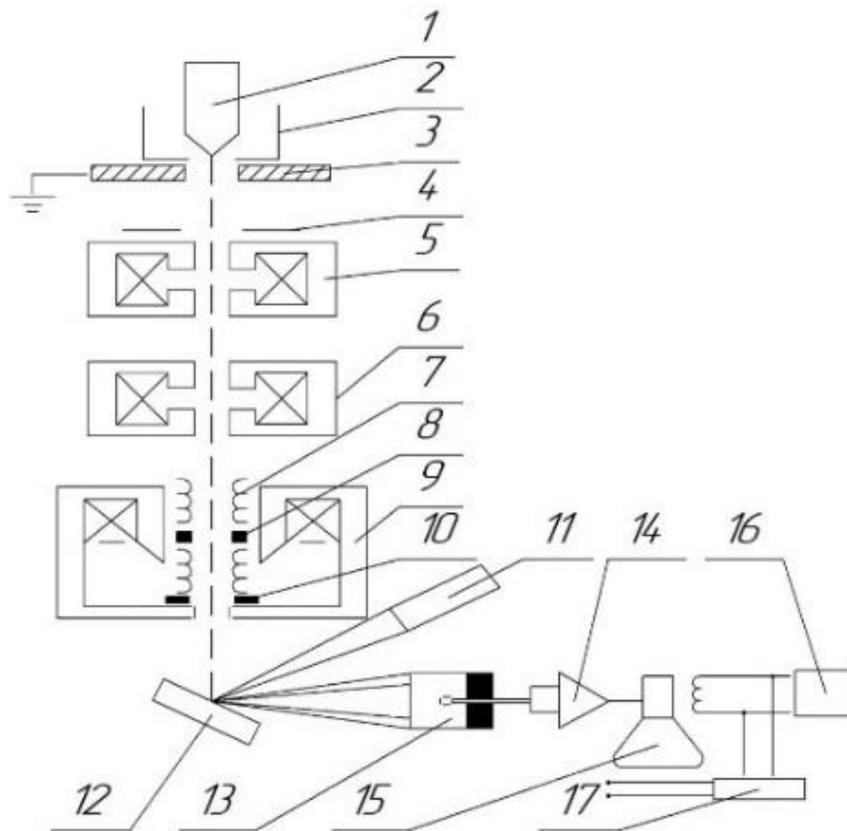


Рисунок 3.11 – Принципиальная схема РЭМ: 1 – катод; 2 – цилиндр Венельта; 3 – анод; 4, 10 – диафрагмы; 5, 6, 9 – электронные линзы; 7 – электромагнитные катушки; 8 – стигматор; 11 – спектрометр; 12 – образец; 13 – детектор; 14 – усилитель; 15 – электронно-лучевая трубка; 16 – генератор; 17 – гониометр

Исследовательский комплекс на базе РЭМ MIRA II TESCAN снабжен микроанализаторами химического состава, что позволило получить более полную информацию об исследуемых поверхностных пленках.

3.7 Исследование седиментационной устойчивости смазочной композиции

Одним из направлений использования порошкообразных материалов является создание смазочных композиций на основе ультра- и наноразмерных порошкообразных материалов, позволяющих улучшать трибологические свойства базовых масел [84, 130, 133]. Однако при разработке таких композиций остается актуальным вопрос обеспечения их седиментационной устойчивости, особенно при использовании их в качестве дисперсной среды моторных масел. Ввиду того, что ультра- и наночастицы обладают высокой поверхностной энергией, то в наносистеме «порошок – масло» самопроизвольно могут протекать процессы коагуляции

(укрупнения), сопровождающиеся уменьшением свободной поверхностной энергии в результате частичного взаимного насыщения некомпенсированных молекулярных сил на поверхности частиц. Данный процесс в итоге может привести к объединению ультра- и наночастиц в крупные конгломераты, которые могут задерживаться фильтрующими агрегатами или выпасть в осадок. Для предотвращения этих процессов необходимо введение в масло дополнительных стабилизаторов, улучшающих диспергирующе-стабилизирующие свойства.

Диспергирование – тонкое измельчение твердых тел в окружающей среде, приводящее к образованию дисперсных систем. Образовавшиеся при диспергировании частицы могут агрегатировать, диссоциировать, менять свое состояние во времени.

Диспергирование может быть осуществлено различными методами.

В качестве диспергирующе-стабилизирующей добавки в масле в основном используют поверхностно-активные вещества. Диспергирующая функция добавки в виде ПАВ проявляется во взаимодействии с не растворимыми в масле твердыми порошкообразными частицами. Суть этого взаимодействия заключается в способности ПАВ сорбироваться на поверхности раздела двух фаз, резко снижая поверхностное натяжение на границе «поверхность масла – твёрдая поверхность» и таким образом расщеплять находящийся в масле порошок. Кроме того, ПАВ значительно легче проникают в зазоры между частицами агломерата и способствуют их разрушению. Они также облегчают смачивание поверхности порошка базовым маслом.

ПАВ на поверхностях раздела двух фаз сорбируется и таким образом упаковывает каждую частицу в индивидуальную оболочку, состоящую из молекул этого вещества.

Существуют различные методы, повышающие эффективность процесса диспергирования подобного типа смесей. Одним из наиболее распространенным вариантом является механическое перемешивание [132].

Кроме того, повысить эффективность диспергирования можно с помощью ультразвука. Процессы, происходящие при воздействии ультразвука, могут существенно стабилизировать дисперсную систему [3].

Применение ультразвука приводит к интенсификации физико-химических процессов в жидкостях. В УЗ-поле возникают кавитация, акустические течения и другие эффекты, способствующие быстрому перемешиванию жидкостей и сопри-

касающихся с ними твердых частиц. При ультразвуковом диспергировании суспензий дисперсность продукта может увеличиваться в несколько раз по сравнению с традиционным механическим перемешиванием [19].

Механизм действия ультразвука на дисперсную фазу заключается в следующем [146]. При его воздействии на границе раздела фаз возникают зоны сжатия и разрежения, которые, в свою очередь, создают высокое давление. Создаваемое ультразвуковой волной избыточное давление накладывается на постоянное гидростатическое давление в системе и суммарно может составить несколько атмосфер. В фазе разрежения во всем объеме жидкости, особенно у границ раздела жидкой фазы и порошка, образуются пузырьки газа (кавитационные пузырьки), которые при повторном сжатии захлопываются, создавая давление до нескольких сотен атмосфер. При этом образуется ударная волна высокой интенсивности, способствующая разрушению образованных конгломератов и крупных частиц.

Для исследования влияния ПАВ на стабилизационную устойчивость ультра- и наноразмерного порошка в моторном масле и режима ультразвуковой обработки полученной суспензии использовали состав разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки (РЭД) [27].

В качестве ПАВ применяли техническую олеиновую кислоту Б-14 (ГОСТ 7580-91). Для приготовления концентрированной РЭД на основе ультра-, нанопорошка использовали специальную установку, схема и внешний вид которой представлены на рисунках 3.3 и 3.4.

При длительном хранении полученная суспензия постепенно расслаивалась, и ее порошкообразная часть выпадала в осадок. Для повышения седиментационной устойчивости приготовленной добавки было предложено использовать ультразвуковую обработку.

Исследование влияния УЗ-обработки на седиментационную устойчивость РЭД, приготовленную по вышеуказанной технологии, проводили следующим образом.

Необходимый для исследования объем добавки заливали в мерный стакан и разливали в 4 пробирки высотой 150–155 мм внутренним диаметром $14 \pm 0,2$ мм. Первые 3 пробирки помещали в ультразвуковую ванну ОЗУ-025 (рисунок 3.12).

Включали ультразвуковую ванну и выдерживали первую пробирку 30 мин, вторую – 15 мин, третью – 5 мин. Четвертую пробирку ультразвуком не обрабатывали. После этого все 4 пробирки устанавливали в штатив Ш-40 и помещали в жидкостный термостат ТЖ-ТС-01, залитый водой, подогретой до 90 ± 1 °С.



Рисунок 3.12 – Ультразвуковая ванна ОЗУ-025 с образцами разработанной РЭД

Эксперимент проводили в 3 этапа. При 1-м этапе пробирки с РЭД, обработанной и не обработанной ультразвуком, выдерживали в течение 60 мин в термостате, который затем выключали на 24 ч (рисунок 3.13). Затем пробирки доставали из термостата и измеряли высоту столба суспензии. Далее эксперимент продолжали до 48 ч (2-й этап) и до 72 ч (3-й этап). Эксперимент повторяли 3 раза.



Рисунок 3.13 – Образцы РЭД после обработки ультразвуком и выдержки в термостате

Влияние обработки РЭД ультразвуком определяли по величине седиментационной устойчивости по формуле:

$$X = A : B \cdot 100 \% ; \quad (3.1)$$

где X – седиментационная устойчивость, %;

A – высота столба суспензии, мм;

B – общая высота столба, мм.

3.8 Методика проведения стендовых испытаний состава смазочной композиции в ДВС

Стендовые испытания проводили в сравнительном режиме на двигателях КАМАЗ-7403.10, работающих на базовом моторном масле Лукойл 15W-40 и на предлагаемой смазочной композиции, состоящей из смеси моторного масла Лукойл 15W-40 и разработанной РЭД. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 14846-88 «Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний» на базе лаборатории испытания двигателей ОАО «КАМАЗ-Дизель» (г. Набережные Челны, Республика Татарстан) согласно разработанной программе-методике.

Обкатку и испытания экспериментальных двигателей проводили на стенде фирмы AVL с гидротормозом фирмы SCHENCK (рисунок 3.14).



Рисунок 3.14 – Стенд для испытания двигателей фирмы AVL

Стенд был укомплектован необходимым оборудованием и приборами, точность которых соответствует требованиям ГОСТ 14846-88.

Стенд включает в себя электродвигатель, тормоз в сборе с весовым механизмом, приспособление для установки испытуемого двигателя, регулировочный реостат, электрошкафы, пульт управления с приборами контроля температуры

охлаждающей воды и масла в системе смазки. Он оборудован также автономной системой подвода и поддержания заданного температурного режима охлаждающей жидкости.

Дымность определяли прибором HR-154 HARTRIDGE, модель и номер – 742/4020D.

Испытания проводили в три этапа: 1 – обкатка дизелей (50 мото-ч); 2 – основной этап (1000 мото-ч); 3 – дополнительный этап (250 мото-ч).

Условия проведения испытаний приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Условия проведения стендовых испытаний дизелей КАМАЗ-7403.10

Наработка двигателя, мото-ч	Барометрическое давление воздуха, кПа	Влажность воздуха, %	Температура, °С		Плотность топлива при $t = 25$ °С, г/см ³
			воздуха на входе в двигатель	топлива на входе в ТНВД	
50	100,4	49	24	22	0,823
1000	101,7	59	37	33	0,823
1200	101,7	55	35	31	0,823

При испытаниях применяли масло Лукойл 15W-40 и дизельное топливо марки «Л», ГОСТ 305-82.

На 1-м этапе испытаний продолжительностью 50 ч были проведены следующие работы в соответствии с требованиями ТУ 7403.1000 018 и программе-методике 740.3902 030 ПМ:

- отбор двигателя, проверка комплектности, качества сборки, основных параметров и регулировок двигателя;
- обкатка двигателя в объёме 50 мото-ч;
- снятие контрольных характеристик, определение дымности отработавших газов и расхода масла на угар;
- оценка приработки деталей и узлов двигателя.

В процессе обкатки и испытания двигателей измеряли следующие параметры:

- крутящий момент двигателя, Н·м (кгс·м);
- частоту вращения коленчатого вала, мин⁻¹;
- температуру охлаждающей жидкости на выходе из двигателя, °С;

- давление масла в системе смазки двигателя в месте установки датчика, кПа (кгс/см²);
- влажность окружающего воздуха, %;
- расход топлива, кг/ч;
- температуру топлива в устройстве для измерения его расхода или на входе в топливную систему двигателя одновременно с измерением расхода топлива, °С;
- атмосферное давление, кПа (мм рт. ст.);
- температуру окружающего воздуха на расстоянии не более 0,15 м от воздухозаборника, К (°С);
- дымность отработавших газов, % (м⁻¹);
- избыточное давление наддувочного воздуха во впускных коллекторах, кПа (кгс/см²);
- расход масла на угар, % от расхода топлива;
- расход воздуха, м³/ч (кг/ч).

Сначала запускали и прогревали двигатели до температуры 80...95 °С при частоте вращения коленчатого вала 900...1600 мин⁻¹ и мощности 11...44 кВт (15...60 л. с.).

Проверяли герметичность соединений в масляной, водяной и топливной системах двигателя при частоте вращения коленчатого вала 900...1600 мин⁻¹ и мощности 11...44 кВт (15...60 л. с.) в течение 15 мин.

При частоте вращения коленчатого вала 2600±20 мин⁻¹ и полной подаче топлива проверяли:

- часовой расход топлива, который должен быть не более 46,5 кг/ч;
- избыточное давление наддувочного воздуха во впускных коллекторах за турбокомпрессорами, которое должно быть не менее 44 кПа (0,45 кгс/см²);
- мощность двигателя, которая должна соответствовать требованиям заводской документации.

Далее контролировали:

- максимальную частоту вращения холостого хода;
- минимальную частоту вращения холостого хода;

- давление масла в главной масляной магистрали, которое при температуре масла в картере двигателя или магистрали до масляного теплообменника 80...95 °С должно составлять 392...539 кПа (4,0...5,5 кгс/см²) при частоте вращения коленчатого вала 2600 мин⁻¹ и не менее 98 кПа (1,0 кгс/см²) при 600 мин⁻¹.

Пятидесятичасовую обкатку двигателей проводили на общепринятых режимах в соответствии с заводской программой-методикой 740.3902 030 ПМ.

Кроме того, определяли расход масла на угар по программе-методике предприятия при частоте вращения коленчатого вала 2600 мин⁻¹ и полной подаче топлива.

Дымность отработавших газов измеряли в соответствии с ГОСТ17.2.2.01.

После 50 мото-ч обкатки проводили неполную разборку двигателей и визуальную оценку технического состояния их основных деталей.

Двигатель считали не выдержавшим испытания:

- при наличии отказов, для устранения которых необходима замена деталей и узлов;

- при появлении стуков, опасных для дальнейшей работы двигателя;

- при несоответствии после окончания испытаний его мощностных, экономических и других показателей требованиям технических условий;

- при расходе масла выше предела, установленного техническими условиями;

- при снижении давления масла ниже нижнего предела, установленного техническими условиями;

- если избыточное давление надувочного воздуха во впускных коллекторах не соответствует требованию заводской программы-методики.

После 50 мото-ч обкатки экспериментальных двигателей проводили их испытания при 1000 мото-ч и дополнительно 250 мото-ч.

На втором этапе испытаний в первый двигатель заливали базовое моторное масло Лукойл 15W-40, а во второй – смазочную композицию, состоящую из смеси моторного масла Лукойл 15W-40 с разработанной добавкой.

По окончании 1250 мото-ч испытаний с экспериментальных двигателей снимали следующие характеристики:

- максимальную мощность двигателя, кВт (л. с.) и часовой расход топлива (кг/ч) при частоте вращения коленчатого вала 2600 мин⁻¹;

- максимальную частоту вращения холостого хода, мин⁻¹;

- минимальную частоту вращения холостого хода, мин^{-1} ;
- избыточное давление воздуха во впускных коллекторах, кПа ($\text{кгс}/\text{см}^2$).

Кроме того, после дополнительного этапа испытаний (250 мото-ч) экспериментальные двигатели разбирали и выполняли микрометраж основных деталей согласно программе-методике. Результаты заносили в микрометражные карты.

Эффективность предлагаемой смазочной композиции оценивали по влиянию ее на основные технические характеристики двигателей и интенсивность изнашивания его основных деталей.

3.9 Методика проведения эксплуатационных испытаний

Сравнительные лабораторные и стендовые испытания не позволяют в полной мере оценить эффективность предлагаемой ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу автотранспортных двигателей, поскольку на работу трущихся сопряжений при этом оказывает влияние гораздо большее число факторов. В связи с этим были проведены эксплуатационные испытания разработанной добавки (рисунок 3.15).



Рисунок 3.15 – Диагностика экспериментальных двигателей при проведении эксплуатационных испытаний разработанной РЭД

С целью исследования влияния разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки на долговечность сопряжения «поршневое кольцо – гильза» в условиях эксплуатации в АО «Декабрист» (Ершовский р-н, Саратовская обл.) были проведены эксплуатационные испытания четырех автомобилей КАМАЗ 55-102, укомплектованных двигателями КАМАЗ 7403.10-260.

Автомобили были приобретены в одно время, эксплуатировались в одних и тех же условиях, выполняли аналогичные работы и имели примерно одинаковый пробег 225–227 тыс. км.

В подконтрольной группе два двигателя заправляли базовым моторным маслом Лукойл 15W-40, остальные – смазочной композицией, приготовленной на основе масла Лукойл 15W-40 с введением в его состав разработанной добавки.

Для учета пробега автомобилей КАМАЗ с экспериментальными двигателями и их отказов в процессе эксплуатации заполняли журнал эксплуатационных испытаний.

Согласно ГОСТ 27.410-87 «Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность», выбран план наблюдений NuT , в соответствии с которым одновременно испытывали N объектов. Отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливали и не заменяли, испытания прекращали по истечении времени испытаний или наработки T для каждого не отказавшего объекта.

Сравнительную оценку долговечности сопряжения «поршневое кольцо – гильза» при использовании базового моторного масла и смазочной композиции, включающей в себя разработанную добавку, в условиях эксплуатации производили согласно методике прогнозирования остаточного ресурса по ГОСТ 27.302-86 «Надежность в технике. Методы определения допускаемого отклонения параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов машин» [41].

«Обработку результатов испытаний проводили с помощью метода математической статистики. Определяли среднее значение, среднее квадратичное отклонение и наибольшую возможную статистическую ошибку» [80].

Остаточный ресурс $t_{\text{ост}}$ рассчитывали по формуле:

$$t_{\text{ост}} = t_{\text{к}} \left[\left(\frac{u_{\text{п}}}{\Pi(t_{\text{к}}) - \Pi_{\text{н}} - \Delta\Pi} \right)^{1/\alpha} - 1 \right], \quad (3.2)$$

где $t_{\text{к}}$ – наработка составной части от начала ее эксплуатации или от возобновления эксплуатации после ремонта до момента контроля;

$u_{\text{п}}$ – предельное отклонение параметра технического состояния, $u_{\text{п}} = |\Pi_{\text{п}} - \Pi_{\text{н}}| - \Delta\Pi$;

$\Pi_{\text{п}}$ – предельное значение параметра;

$\Pi_{\text{н}}$ – номинальное значение параметра;

$\Delta\Pi$ – показатель изменения параметра технического состояния за период приработки;

$\Pi(t_{\text{к}})$ – значение параметра, измеренное при наработке $t_{\text{к}}$;

α – показатель функции, аппроксимирующей изменение параметра.

«Значения начального и предельного параметров и показателя изменения параметра за период приработки были выбраны согласно нормативно-технической документации.

Параметр $\Pi(t_{\text{к}})$ измеряли с помощью компрессометра К 74.36 при частоте вращения коленчатого вала на холостом ходу $850 \dots 900 \text{ мин}^{-1}$. Определяли давление сжатия в режиме работы двигателя при минимальной частоте холостого хода, что обеспечивало точность измерения в различных цилиндрах за счет поддержания определенного скоростного режима двигателя, в отличие от замера компрессии при проворачивании двигателя стартером» [80].

За действительное значение компрессии принимали среднюю величину по результатам трех измерений. Параметр $\Pi(t_{\text{к}})$ определяли трижды через каждые 16,0–16,5 тыс. км пробега автомобилей контрольной группы, совмещая данную диагностическую операцию с проведением соответствующего вида технического обслуживания.

В соответствии с техническими требованиями, давление сжатия (компрессия) на холостом ходу для новых двигателей КАМАЗ-7403.10 должно составлять 3,4...3,6 МПа. Допустимое снижение давления – не ниже 3,0 МПа.

Показатель степени α задается в нормативно-технической документации как постоянная величина для каждой из составных частей агрегатов. По данным [129], для параметра, характеризующего изменение зазора в ЦПГ, для автотранспортного двигателя $\alpha = 1,3$.

3.10 Методика оценки изменения физико-химических характеристик моторных масел под действием порошкообразных добавок

В процессе проведения исследований оценивали влияние порошкообразных компонентов добавки на вязкость, щелочное и кислотное числа моторного масла, а также на содержание механических примесей в нем.

Физико-химический анализ образцов моторного масла Лукойл 15W-40 с добавкой и без нее проводили в лабораторных условиях по известным методикам и в соответствии с ГОСТами [36, 38–40].

На рисунке 3.16 представлен общий вид оборудования, используемого для определения физико-химических характеристик моторных масел.



а



б



в

Рисунок 3.16 – Фрагменты оборудования, используемого при проведении физико-химического анализа масел: *а* – определение щелочного и кислотного чисел; *б* – определение вязкости масла; *в* – определение содержания примесей в масле

Оценку физико-химических свойств проб проводили следующим образом. Сначала оценке подвергали товарное моторное масло Лукойл 15W-40, затем – смазочную композицию, состоящую из смеси товарного моторного масла Лукойл 15W-40 и разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки.

Физико-химические свойства предлагаемой смазочной композиции с разработанной добавкой определяли после 5000, 10000 и 15000 км пробега автомобиля КАМАЗ 55-102, укомплектованного двигателем КАМАЗ 7403.10-260.

При проведении эксплуатационных испытаний двигателей КАМАЗ 7403.10-260 с экспериментальными смазочными материалами оценивали изменение щелочного и кислотного чисел моторного масла, поскольку эти показатели косвенно свидетельствуют об эффективности работы присадок и добавок в моторном масле.

Существует определенная взаимосвязь изменения щелочного числа масла и некоторых параметров работы двигателя, зависящих от его технического состояния. Например, при значительном износе деталей цилиндропоршневой группы ДВС растет их температура, что приводит к увеличению угара моторного масла, а также содержащихся в нем присадок и добавок. Нарушается обычная закономерность изменения щелочного числа моторного масла в зависимости от наработки ДВС.

Кислотное число, как правило, увеличивается при накоплении продуктов окисления в базовом масле. При этом следует учитывать, что кислотное число исходного масла зависит от состава и количества присадок и добавок в нем.

При использовании металлсодержащих добавок важными моментами являются определение содержания механических примесей в масле после добавления в него разработанной добавки, а также оценка влияния, предлагаемого трибопрепарата на изменение интенсивности изнашивания деталей двигателя.

3.11 Методика обработки экспериментальных данных и оценки точности измерений

«Для получения наибольшей достоверности опытных данных при проведении экспериментов создавали условия, при которых были сведены к минимуму ошибки измерений, а также применяли методы математической статистики при обработке и оценке точности результатов наблюдений.

При измерении соответствующих величин выбирали методы и приборы, обеспечивающие наибольшую точность. Перед началом, в процессе и в конце экспериментов производили тщательную тарировку и настройку приборов. Контролируемые параметры измеряли в определенной последовательности и с необходимым количеством замеров. При проведении экспериментов учитывали факторы, влияющие на результаты, что позволяло своевременно обнаружить аномальные результаты и исключить их.

Обработку экспериментальных данных и построение графиков производили по средним величинам замеренных параметров» [5]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^n x_k}{n_{\text{и}}}, \quad (3.3)$$

где \bar{x} – среднее арифметическое значение;

x_k – случайный результат при k -м измерении;

$n_{\text{и}}$ – количество измерений.

Для того, чтобы учесть возможные отклонения \bar{x} от искомого точного значения, вычисляли среднюю квадратичную ошибку среднего арифметического, которая является вероятностной характеристикой совокупности всевозможных значений средних арифметических из $n_{\text{и}}$ измерений:

$$D(\bar{x}) = \frac{\sigma^2}{n_{\text{и}}}, \quad (3.4)$$

где $D(\bar{x})$ – средняя квадратичная ошибка среднего арифметического;

σ – средняя квадратичная ошибка одного измерения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n_{\text{и}}} (x_k - \bar{x})^2}{n_{\text{и}} - 1}}. \quad (3.5)$$

Средняя квадратичная ошибка одного измерения является числовой характеристикой качества совокупности измерений, для которых она задана или вычислена. Чем больше σ , тем хуже качество измерений.

Для оценки качества измерений использовали еще 3 величины:

- вероятностную ошибку r :

$$r \approx \frac{2}{3} \sigma; \quad (3.6)$$

- абсолютную ошибку m :

$$100$$
$$m \approx 0,86\sigma, \quad (3.7)$$

- меру точности n :

$$n \approx \frac{0,7}{\sigma}. \quad (3.8)$$

Вероятностная и абсолютная ошибки тем больше, чем хуже качество измерений. Мера точности растет с повышением точности измерений» [5, 41, 74, 119].

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Обоснование состава ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу

С целью выбора состава ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу, способствующей улучшению его трибологических свойств, были проведены сравнительные лабораторные испытания наиболее широко распространенных порошкообразных наполнителей, согласно методике, представленной в главе 3.

Для испытаний были выбраны:

- наноразмерные порошки, полученные методом плазменной переконденсации крупнодисперсного сырья: меди М1 (НРПМ); сплава Cu (50 %) - Sb (50 %) (НРПС); легированного сплава Cu (60 %) - Zn (40 %) - S (1 %) - P (1%) (НРПЛЛ);
- ультрадисперсный порошок полититаната калия (УДППТК);
- смесь наноразмерного порошка легированного сплава Cu-Zn-S-P (50 %) и ультрадисперсного порошка полититаната калия (50 %) (УНРПЛП).

Предварительная концентрация испытываемых порошкообразных добавок к базовому моторному маслу Лукойл 15W-40 была выбрана 0,2 %, согласно рекомендациям, представленным в работах и патентах [91, 95, 101, 102].

Сравнение производили с базовым маслом Лукойл 15W-40.

Анализ результатов испытаний показал, что наименьший износ образцов 2,4 мг обеспечивала смазочная композиция, состоящая из моторного масла Лукойл 15W-40 и добавки УНРПЛП, содержащей смесь наноразмерного порошка легированного сплава Cu-Zn-S-P (50 %) и ультрадисперсного порошка полититаната калия (50 %). Она была в 7,6 раза меньше по сравнению с базовым моторным маслом Лукойл 15W-40 – 18,2 мг (рисунок 4.1).

При использовании остальных порошкообразных добавок износ образцов трения уменьшился по сравнению с базовым маслом Лукойл 15W-40 следующим образом: НРПМ – в 2,1 раза, НРПС – в 2,3 раза, УДППТК – в 2,8 раза, НРПЛЛ – в 3,4 раза. Результаты испытаний представлены на рисунке 4.1.

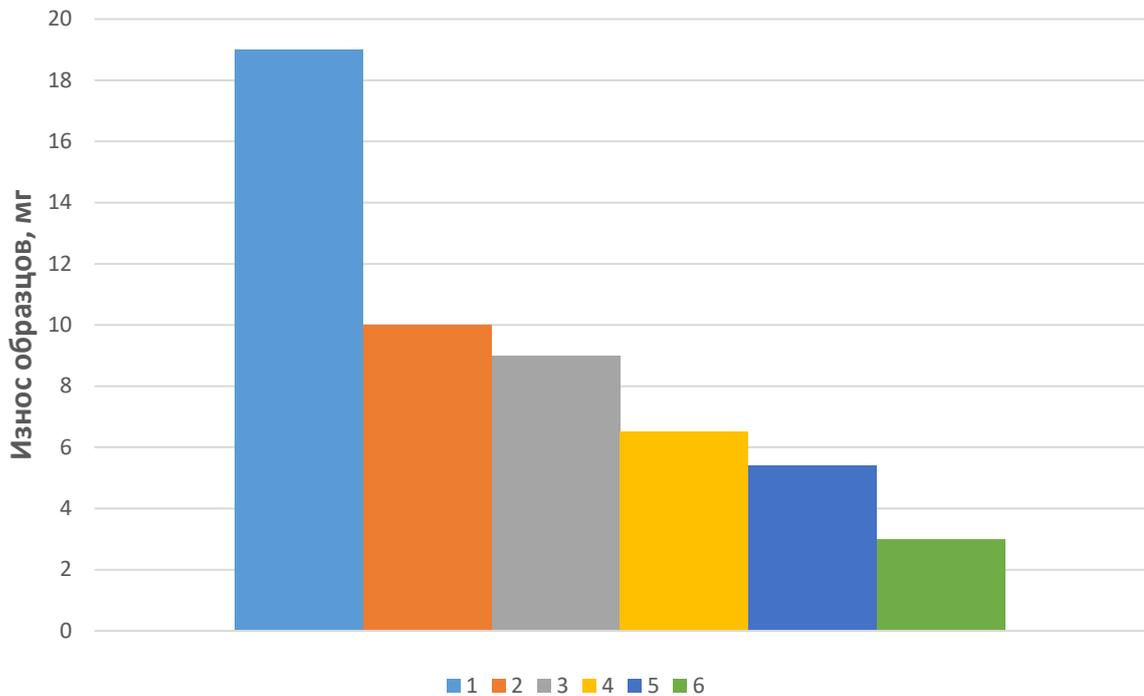


Рисунок 4.1 – Износ образцов, испытанных при использовании смазочных композиций:
 1 – Лукойл 15W-40; 2 – Лукойл 15W-40 + НРПМ; 3 – Лукойл 15W-40 + НРПС;
 4 – Лукойл 15W-40 + УДППТК; 5 – Лукойл 15W-40 + НРПЛЛ;
 6 – Лукойл 15W-40 + УНРПЛП

Зависимости момента трения от продолжительности эксперимента на базовом моторном масле Лукойл 15W-40 и с экспериментальными добавками имели одинаковый характер (рисунок 4.2). В первые 0,5 ч происходило резкое увеличение этого показателя. При этом на масле Лукойл 15W-40 с добавкой НРПМ момент трения возрастал интенсивнее по сравнению с другими композициями и даже по сравнению с базовым маслом Лукойл 15W-30. Он составил 6,7 Н·м, что на 16 % больше, чем на масле с добавкой УНРПЛП.

Интенсивность снижения момента трения при использовании экспериментальных смазочных композиций была различной. Моторное масло Лукойл 15W-40 обеспечивало плавное уменьшение этого показателя с 6,6 до 5,8 Н·м. Смазочная композиция УНРПЛП способствовала сокращению момента трения с 5,7 до 3,2 Н·м, что в 1,8 раза меньше по сравнению с базовым маслом.

За 3 ч испытаний момент трения при использовании экспериментальных смазочных композиций изменился следующим образом: на базовом масле с порошкообразной добавкой НРПМ с 6,7 до 5,3 Н·м, или на 10 % меньше, чем на мотор-

ном масле Лукойл 15W-40; с добавкой НРПС – с 6,3 до 4,2 Н·м (в 1,38 раза меньше); с добавкой УДППТК – с 6,0 до 3,4 Н·м (в 1,71 раза меньше), а с добавкой НРПЛЛ – с 6,2 до 3,8 Н·м (в 1,53 раза меньше по сравнению с базовым маслом Лукойл 15W-40) (рисунок 4.2).

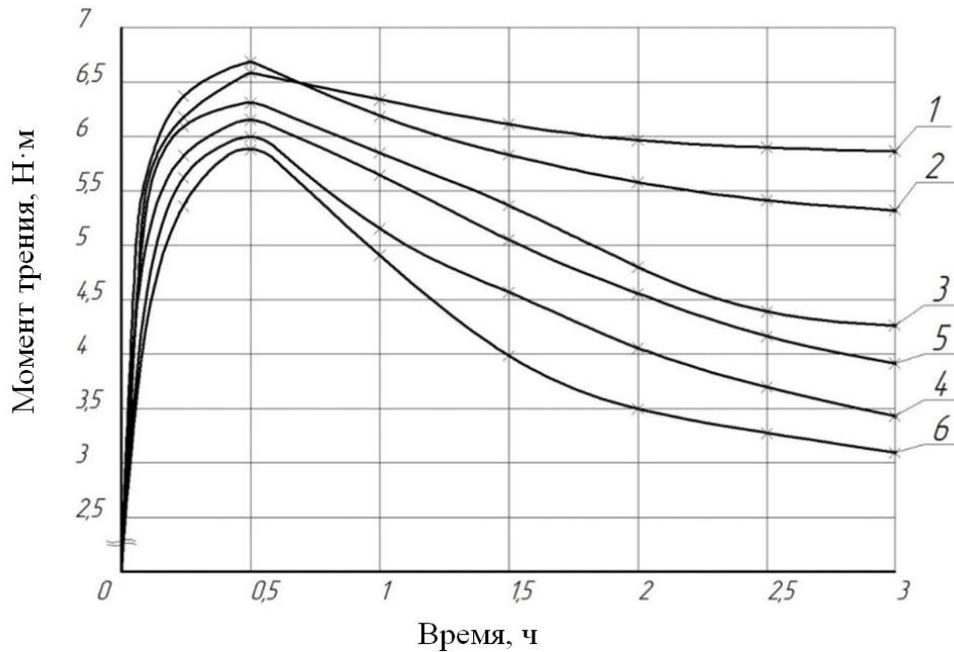


Рисунок 4.2 – Изменение момента трения в процессе испытания смазочных композиций:
 1 – Лукойл 15W-40; 2 – Лукойл 15W-40 + НРПМ; 3 – Лукойл 15W-40 + НРПС;
 4 – Лукойл 15W-40 + УДППТК; 5 – Лукойл 15W-40 + НРПЛЛ;
 6 – Лукойл 15W-40 + УНРПЛЛ

Исследования по определению влияния экспериментальных порошкообразных добавок на температуру модельных образцов показали, что под действием этих добавок температура уменьшается по сравнению с базовым моторным маслом Лукойл 15W-40 (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Изменение температуры поверхности ролика при испытании на различных смазочных композициях (°С)

Время, мин	Лукойл 15W-40	Лукойл 15W-40 с добавкой				
		НРПМ	НРПС	УДППТК	НРПЛЛ	УНРПЛЛ
30	194	189	187	185	184	182
60	192	188	184	184	183	180
90	190	186	183	183	180	177
120	188	184	183	180	178	173
150	188	183	181	177	174	171
180	187	182	178	174	172	166

Примечание. НРПМ – наноразмерный порошок меди; НРПС – наноразмерный порошок сплава Cu-Sb; УДППТК – ультрадисперсный порошок полититаната калия; НРПЛЛ – наноразмерный порошок легиро-

ванного сплава Cu-Zn-S-P; УНРПЛП – смесь наноразмерного порошка легированного сплава Cu-Zn-S-P и ультрадисперсного порошка полититаната калия.

Наибольшее снижение температуры обеспечила добавка УНРПЛП. При ее использовании температура поверхности трения образцов за 3 ч испытаний уменьшилась на 13 % по сравнению с базовым маслом Лукойл 15W-40.

Добавки НРПМ, НРПС, УДППТК и НРПЛЛ снизили температуру поверхности трения по сравнению с базовым маслом в среднем на 3 %, 5, 8 и 9 % соответственно.

Обработку данных предварительных лабораторных исследований различных смазочных композиций на основе порошкообразных добавок проводили методами математической статистики (приложение 3).

Проведенные предварительные сравнительные лабораторные испытания позволили установить эффективность экспериментальных порошкообразных добавок к моторному маслу. Добавки, содержащие ультра- и наноразмерные порошки, существенно увеличивали трибологические свойства базового моторного масла Лукойл 15W-40. Наибольшей эффективностью отличилась добавка УНРПЛП, состоящая из смеси ультраразмерного порошка полититаната калия и наноразмерного порошка легированной латуни, что подтвердило нашу гипотезу. Смесь данных порошков формирует поверхностный слой, обладающий высокими антифрикционными свойствами (по-видимому, в основном за счет действия ультрадисперсного порошка полититаната калия) и высокими противоизносными свойствами за счет свойств сплава меди и цинка, легированных серой и фосфором.

4.2 Результаты сравнительных трибологических исследований предлагаемой смазочной композиции и базового моторного масла

Эффективность предлагаемого состава ультра-, нанокпозиционной добавки при определении рационального состава смазочной композиции оценивали в ходе сравнительных трибологических лабораторных испытаний согласно методике, описанной в 3-й главе.

Трибологические свойства разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки сравнивали со свойствами моторного масла Лукойл 15W-40.

Графики, построенные по полученным значениям момента трения и темпера-

туры, представлены на рисунках 4.3 и 4.4.

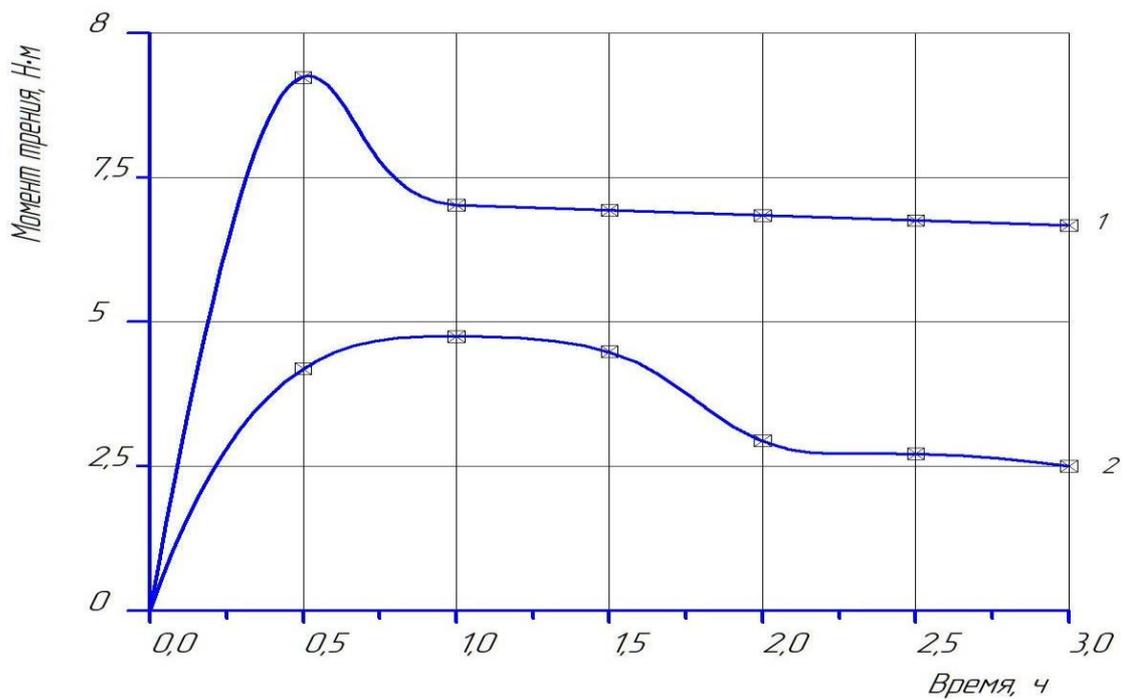


Рисунок 4.3 – Изменение момента трения в ходе испытаний смазочных материалов: 1 – Лукойл 15W-40; 2 – Лукойл 15W-40 + РЭД

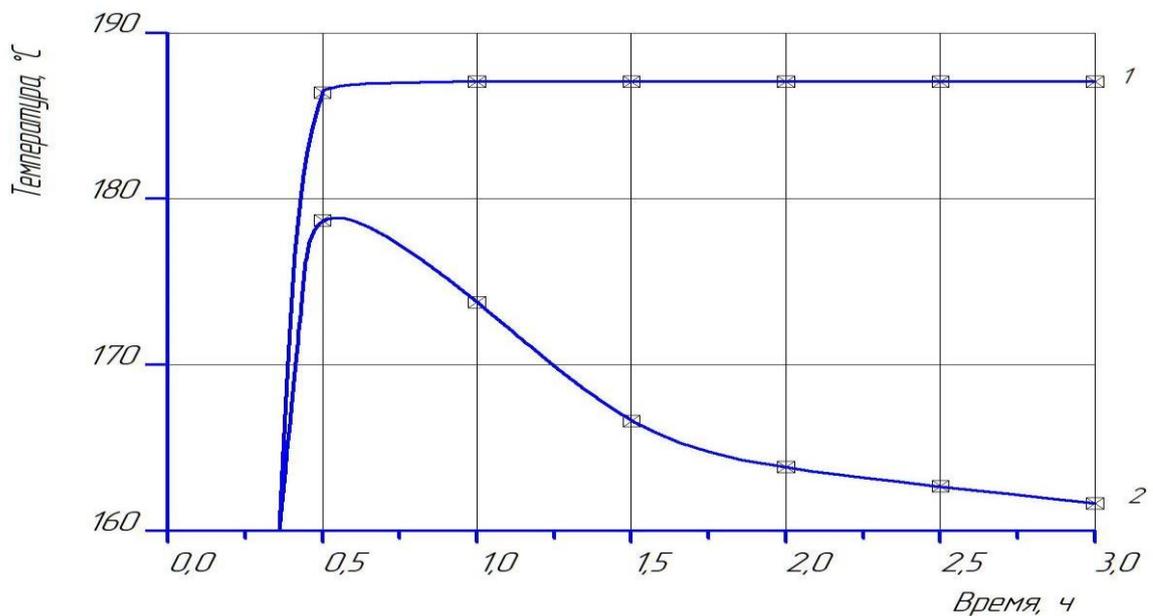


Рисунок 4.4 – Изменение температуры в паре трения «ролик – колодка» в ходе трибологических испытаний смазочных материалов:
1 – Лукойл 15W-40; 2 – Лукойл 15W-40 + РЭД

Анализ представленных зависимостей показал, что использование смазочной композиции, созданной на базе моторного масла Лукойл 15W-40 и предлагаемой РЭД, приводит к снижению момента трения в контакте элементов модельной па-

ры трения в 2,2 раза по сравнению с базовым маслом Лукойл 15W-40.

Температура, генерируемая в зоне трения, является одним из важных показателей, характеризующих антифрикционные свойства смазочного материала. Анализ полученной зависимости (см. рисунок 4.4.) показал, что рабочая температура трущихся деталей в ходе испытаний моторного масла с предлагаемой РЭД для пары трения «поршневое кольцо – гильза» уменьшилась в 1,14 раза по сравнению с базовым маслом Лукойл 15W-40.

По результатам контроля износа трущихся образцов построена гистограмма, представленная на рисунке 4.5.

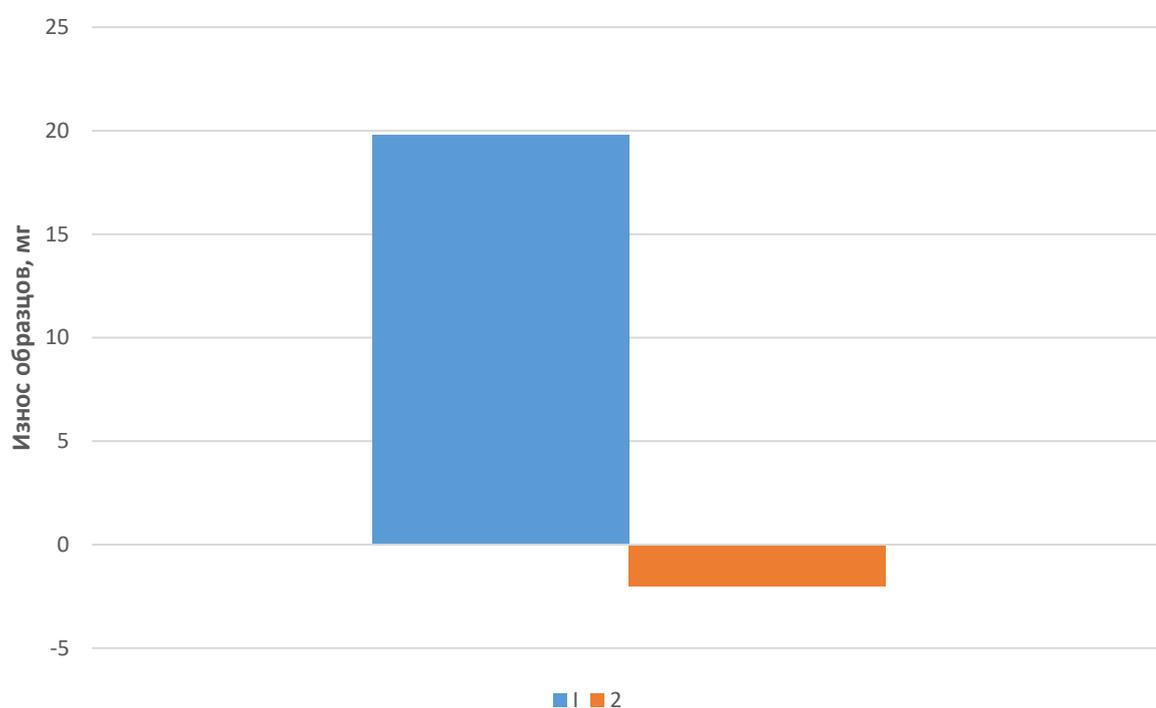


Рисунок 4.5 – Износ колодок, работавших на смазочных материалах:
1 – Лукойл 15W-40; 2 – Лукойл 15W-40 + РЭД

Из анализа гистограммы (см. рисунок 4.5) можно сделать вывод о том, что введение предлагаемой РЭД в моторное масло Лукойл 15W-40 позволяет не только существенно улучшить его противоизносные свойства, но и реализовать восстановительный эффект. Так, в результате работы пары трения «ролик – колодка» в течение 3 ч с использованием в качестве смазочной среды моторного масла Лукойл 15W-40 с добавлением разработанной РЭД прирост массы колодок составил в среднем на 2 мг.

Высокую эффективность смазочной композиции, полученной с использова-

нием предлагаемой добавки, можно объяснить наличием в базовом масле порошкообразных компонентов – наночастиц легированной латуни и ультрадисперсной антифрикционной составляющей – ПТК.

Механизм действия предлагаемой добавки основан, во-первых, на способности наноразмерного порошка легированной латуни, за счет адгезии, заполнять микровпадины и микродефекты трущихся поверхностей, увеличивая тем самым фактическую площадь контакта, а во-вторых, на способности частиц ПТК участвовать в процессах формирования на рабочих поверхностях деталей слоя с улучшенными антифрикционными характеристиками [83, 114, 123]. Используемые частицы добавки создают на поверхностях трения модифицированный слой с высокими антифрикционными и противоизносными свойствами, предохраняющий материал детали от изнашивания.

Результаты сравнительных трибологических лабораторных испытаний показали, что разработанная добавка к моторному маслу позволяет улучшить антифрикционные и противоизносные свойства базового масла. Эффективность полученной смазочной композиции объясняется механо-трибохимическими процессами, протекающими в зоне фрикционного контакта с участием используемых ультра- и наноразмерных компонентов, в результате чего образуется поверхностный слой с повышенными трибологическими свойствами.

Анализируя результаты лабораторных исследований влияния предлагаемая ремонтно-эксплуатационной добавки на трибологические свойства базового моторного масла, можно сделать вывод о том, что разработанная РЭД по контролируемым параметрам существенно улучшает трибологические свойства базового моторного масла Лукойл 15W-40.

Обработку данных лабораторных исследований проводили методами математической статистики (приложение 7).

4.3 Результаты исследований седиментационной устойчивости состава добавки на основе ультра- и наноразмерных порошков

Методика проведения исследований, направленных на повышение седиментационной устойчивости разработанной РЭД, представлена в 3-й главе.

Было сделано предположение о том, что повысить эффективность воздействия ПАВ на дисперсную часть смазочной композиции и улучшить ее седиментационную устойчивость можно за счет использования ультразвука.

Результаты исследований представлены в таблице 4.2 и на рисунке 4.6.

Таблица 4.2 – Результаты исследования влияния состава разработанной РЭД на седиментационную устойчивость после обработки ультразвуком

№ пробирки с маслом МС-20	Продолжительность обработки ультразвуком, мин	Седиментационная устойчивость, %		
		через 24 ч	через 48 ч	через 72 ч
1	5	92	91	83
2	15	93	89	81
3	30	95	88	80
4	–	100	99	93

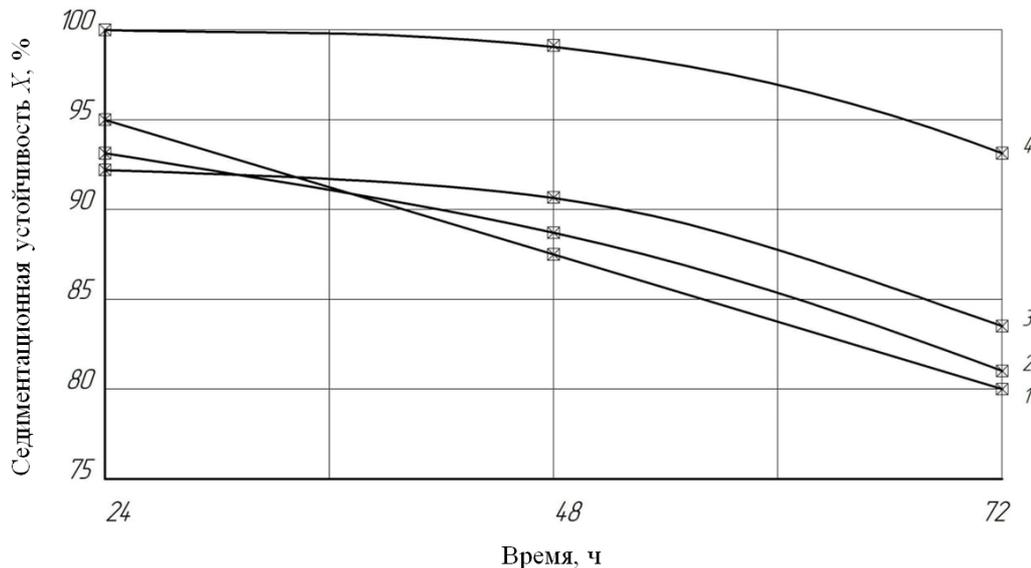


Рисунок 4.6 – Изменение седиментационной устойчивости предлагаемой РЭД, обработанной ультразвуком в течение: 1-й вариант – 30 мин; 2-й – 15 мин; 3-й – 5 мин; 4-й – без УЗ-обработки

Анализ кривых, представленных на рисунке 4.6, показывает, что обработка ультразвуком ухудшает седиментационную устойчивость РЭД. С увеличением ее продолжительности ускоряется процесс осаждения дисперсной фазы суспензии. При обработке ультразвуком в течение 30 мин седиментационная устойчивость добавки в интервале с 24 до 72 ч уменьшилась с 95 до 80 %, а при обработке в течение 5 минут – с 92 до 83 %. В первом варианте интенсивность снижения седиментационной устойчивости добавки оказалась в 1,7 выше по сравнению со вторым. Без ультразвуковой обработки (4-й вариант) седиментационная устойчивость предлагаемой РЭД изменилась с 100 до 93 %.

Таким образом, интенсивность снижения седиментационной устойчивости добавки, не обработанной ультразвуком, в 2,3 раза ниже, чем при 30-минутной обработке и в 1,4 раза ниже по сравнению с 5-минутной обработкой. После 72 ч наблюдений установлено, что после 30-минутной обработки разработанной РЭД ультразвуком ее седиментационная устойчивость составила 80 %, после 5-минутной – 83 %, без УЗ-обработки – 93 %. Это в 1,16 и 1,12 раза выше, чем в первом и втором вариантах соответственно.

Обработку данных исследований седиментационной устойчивости предлагаемой РЭД проводили методами математической статистики (приложение 8).

Полученные результаты можно объяснить, процессами, происходящими на границе разделе фаз «твердая поверхность порошка – пленка ПАВ».

По-видимому, под действием ультразвуковых волн возникают кавитационные явления, разрушающие оболочку вокруг каждой ультра- и наночастицы, образованную предыдущей обработкой ПАВ, что в итоге приводит к повышению физико-химической активности ультра-, наноразмерного порошка, агрегатированию частиц и ускорению процессов выпадения в осадок.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что при изготовлении добавки на основе ультра- и наноразмерных частиц целесообразно ограничиться их механическим перемешиванием при определенных температуре и концентрации ПАВ.

4.4 Оценочные результаты теоретических исследований

Износные испытания проводили по методике, представленной в 3-й главе, с использованием модельной пары трения «ролик – колодка», позволяющей имитировать работу трибосопряжения ДВС «поршневое кольцо – гильза» (рисунок 4.7).

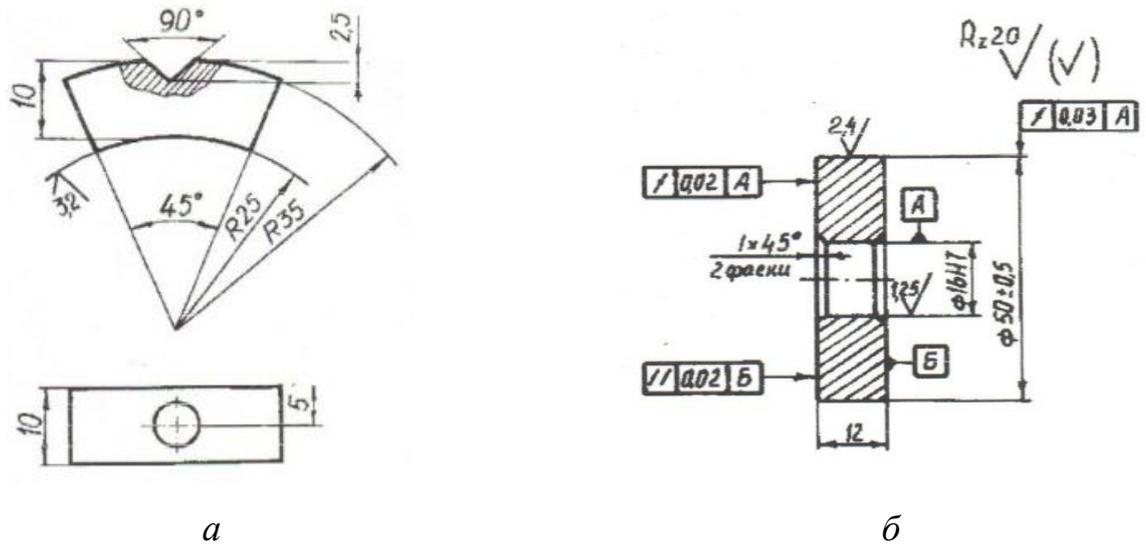


Рисунок 4.7 – Образцы для испытания на машине трения СМЦ-2: *а* – колодка; *б* – ролик

Трибологические свойства разработанной добавки сравнивали со свойствами моторного масла Лукойл 15W-40.

С целью установления характера процесса изнашивания модельных образцов в процессе эксперимента машина трения СМЦ-2 была оснащена специальным устройством автоматической регистрации суммарного износа испытуемых образцов (рисунок 4.8) [82].

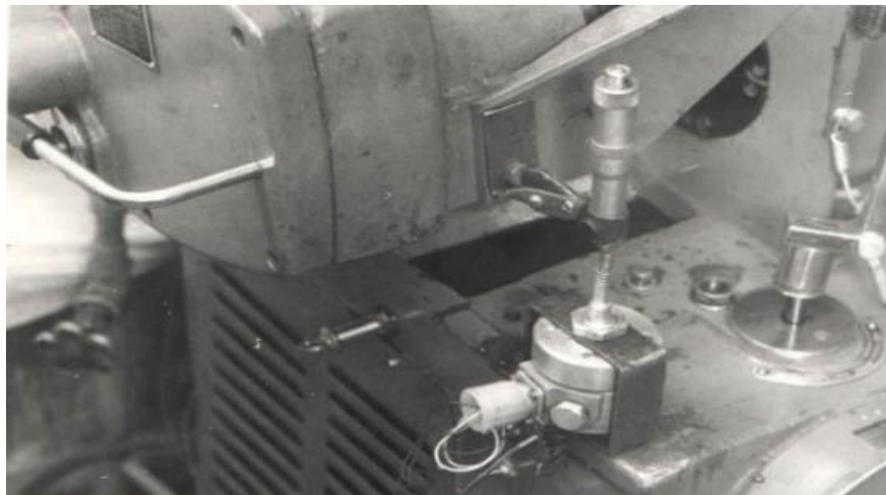


Рисунок 4.8 – Прибор для определения износа модельных образцов на машине трения СМЦ-2 в процессе эксперимента

Механическая часть устройства состоит из датчика ДТМ-15, переоборудованного для измерения линейных перемещений и закрепленного на основании машины трения, и поворотной головки микрометра, представляющей собой регулируемую опору для штока датчика. Датчик ДТМ-15 включен в электрическую

схему машины трения, состоящую из стабилизированного источника питания, потенциометра-самописца КСП-2, регулируемых регистров настройки схемы и резисторов (рисунок 4.9).

Прибор позволяет получать данные об изменении величины износа модельных образцов пар трения в следующем виде (рисунок 4.10). Их анализ дает возможность определить величину скачка $\Delta L_{кУ}$, которая соответствует величине износа образца пары трения (ролика) в месте перехода с нерабочей поверхности на рабочую.

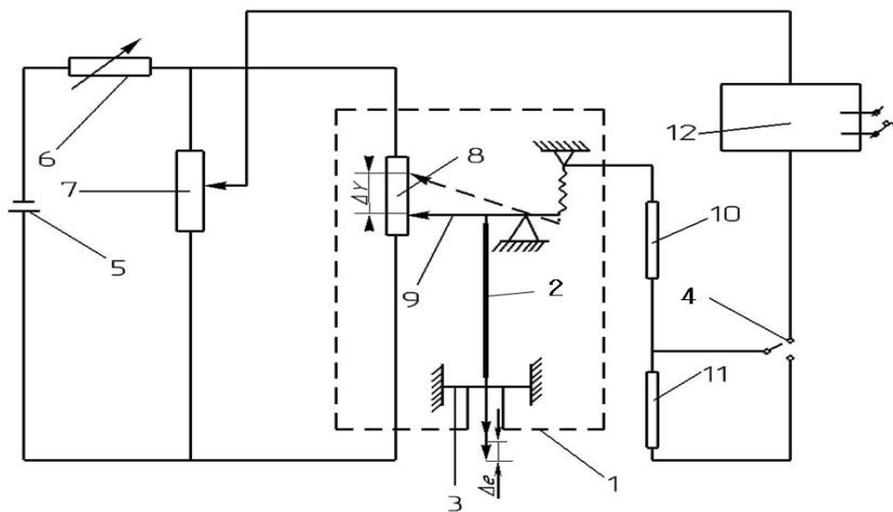


Рисунок 4.9 – Схема прибора для определения износа модельных образцов на машине трения СМЦ-2 в процессе эксперимента: 1 – датчик; 2 – шток; 3 – мембрана; 4 – переключатель; 5 – источник стабилизированного питания; 6, 7 – настольные резисторы ИСП; 8 – потенциометр ДТМ-15; 9 – рычаг; 10, 11 – резисторы; 12 – потенциометр

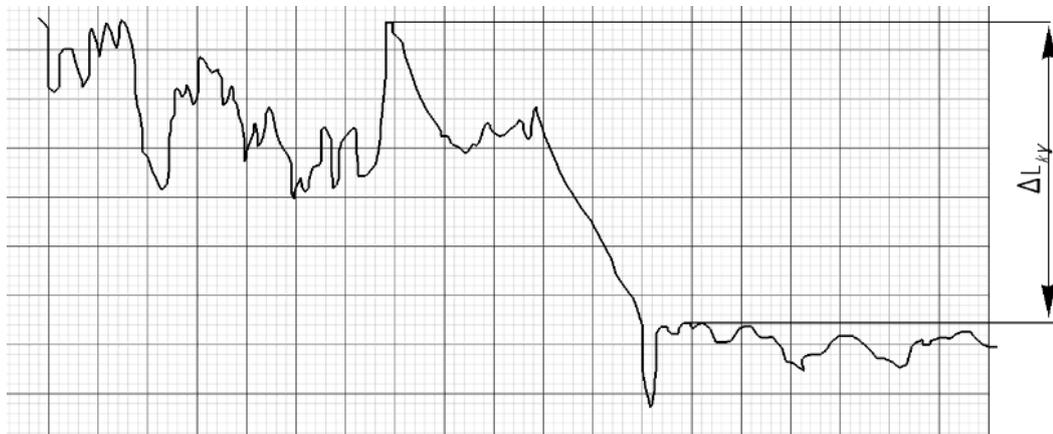
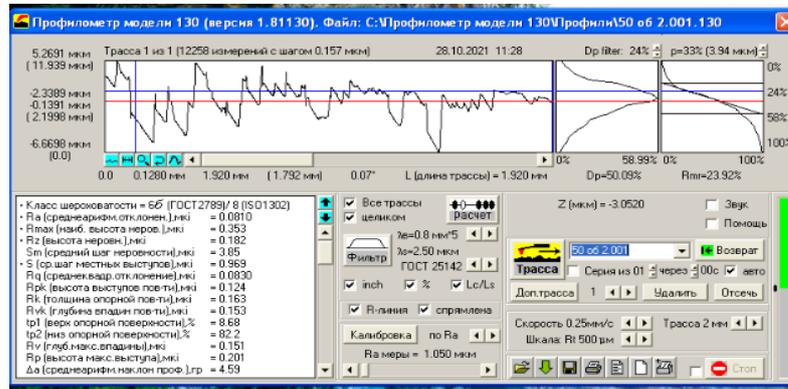
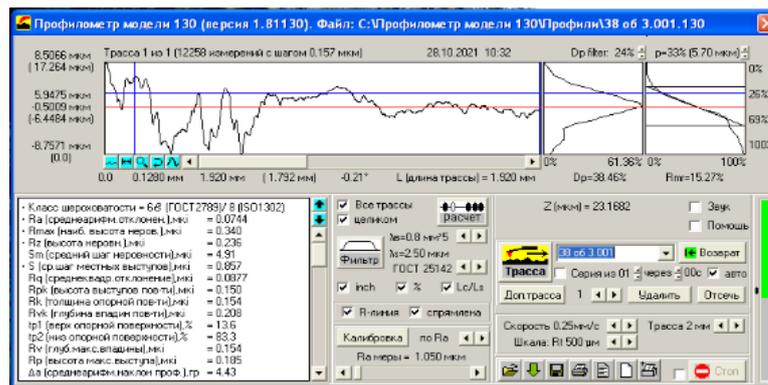


Рисунок 4.10 – Изменение величины износа поверхности трущихся образцов, полученной с помощью специального прибора

Шероховатость поверхностей трения образцов определяли с помощью профилометра модели 130 степени точности 1 (ТУ 3943-001-70281271). В качестве примера представлены образцы шероховатости поверхностей трения деталей, испытанных на смазочных материалах Лукойл 15W-40 и Лукойл 15W-40 + РЭД (рисунок 4.11).



a



б

Рисунок 4.11 – Шероховатости поверхностей трения образцов, испытанных на смазочных материалах: *a* – Лукойл 15W-40; *б* – Лукойл 15W-40 + РЭД

Износ образцов определяли двумя способами – взвешиванием (по разности массы образцов до и после испытания) и с помощью прибора для определения износа модельных образцов на машине трения СМЦ-2 в процессе эксперимента (см. рисунок 4.8). Дополнительно определяли массу изношенной части шероховатости поверхностей трения образцов за время их работы.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных проводили по величине износа ролика за время эксперимента. Было сделано допущение, что величины износа ролика и колодки одинаковы.

Эффективность математической модели изнашивания трущихся деталей оценивали по разности значений износа образцов трения, полученных расчетным и

экспериментальными методами. Таким образом, сравнивали противоизносные свойства разработанной смазочной композиции, состоящей из смеси моторного масла Лукойл 15W-40 и предлагаемой РЭД, со свойствами базового моторного масла Лукойл 15W-40. Проверяли также сходимость теоретических и экспериментальных данных.

Результаты проверки теоретических исследований

Образец 1 (базовое масло Лукойл 15W-40)

Исходя из исходных данных детали, были определены следующие числовые характеристики:

- вероятность попадания величины ξ_k в интервал $[0; 1] - P_k = 0,0012$;
- математическое ожидание – $\mu_k = 0,4158$;
- дисперсия – $\sigma_k^2 = 0,04301$;
- среднее квадратичное отклонение – $\sigma_k = 0,2074$;
- плотность вероятности $p(x) = 1,92365$;
- значение функции распределения $F(x) = 0,99865$.

На основании полученных числовых значений был сделан вывод о подчинении процесса изнашивания закону нормального распределения.

Эксперимент продолжался 3 ч. По его окончании были получены следующие результаты: $L_{k\alpha 2} = 10$ мм; $L_{k\alpha 1} = 2$ мм; $L_{k\beta} = 1$ мм; $L_{k\gamma} = R = 25$ мм; $\Delta H_{k1} = 0,00005$ мм; $\Delta H_{k21} = 0,00003$ мм; $\Delta L_{k\gamma 1} = 0,0016$ мм.

При этом объем изношенной части детали $V_{\Delta 1}$:

$$\begin{aligned} V_{\Delta 1} &= 2\pi R \cdot 1L_{k\beta}L_{k\alpha 2}\Delta L_{k\gamma 1} + (\Delta H_{k1} - \Delta H_{k2}) = \\ &= 2 \cdot 3,14 \cdot 25 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 0,0016 + (0,00005 - 0,00003) = 2,512 \text{ мм}^3, \end{aligned}$$

а износ по массе I , рассчитанный по формуле (2.80):

$$I = \rho V_{\Delta} = 0,0078 \cdot 5,18 = 0,0196 \text{ г},$$

где ρ – плотность материала образца трения (для чугуна $\rho = 0,0078$ г/мм³).

Суммарный износ образцов трения I_{c1} :

$$I_{c1} = I_1 \cdot 2 = 0,0392 \text{ г.}$$

Скорость изнашивания И:

$$И = \frac{\rho V_{\Delta}}{t} = \frac{0,0392}{3} = 0,0131 \text{ г/ч.}$$

*Образец 2 (базовое моторное масло Лукойл 15W-40
и ремонтно-эксплуатационная добавка)*

Исходя из исходных данных детали, были определены следующие числовые характеристики:

- вероятность попадания величины ξ_k в интервал $[0; 1] - P_k = 0,0006$;
- математическое ожидание – $\mu_k = 0,2158$;
- дисперсия – $\sigma_k^2 = 0,07301$;
- среднее квадратичное отклонение – $\sigma_k = 0,2704$;
- плотность вероятности $p(x)^+ = 1,47645$;
- значение функции распределения $F(x) = 0,99702$.

На основании полученных числовых значений был сделан вывод о подчинении процесса изнашивания закону нормального распределения, причем приращение плотности вероятности по сравнению с первым образцом:

$$\Delta p(x) = p(x)^+ - p(x)^- = -0,45005,$$

что свидетельствует о целесообразности применения ремонтно-эксплуатационной добавки, позволяющей уменьшить износ деталей за счет снижения вероятности попадания вершин шероховатости в зону трения.

По окончании эксперимента были получены следующие результаты: $L_{k\alpha 2} = 10$ мм; $L_{k\alpha 1} = 2$ мм; $L_{k\beta} = 1$ мм; $L_{k\gamma} = R = 25$ мм; $\Delta H_{k1} = 0,00005$ мм; $\Delta H_{k2} = 0,00001$ мм; $\Delta L_{k\gamma 1} = 0,0065$ мм.

Объем изношенной части детали $V_{\Delta 1}$:

$$\begin{aligned} V_{\Delta 1} &= 2\pi R \cdot 1L_{k\beta}L_{k\alpha 2}\Delta L_{k\gamma 1} + (\Delta H_{k1} - \Delta H_{k2}) = \\ &= 2 \cdot 3,14 \cdot 25 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 0,0065 + (0,00005 - 0,00001) = 1,021 \text{ мм}^3. \end{aligned}$$

Износ по массе I :

$$I = \rho V_{\Delta} = 0,0078 \cdot 1,021 = 0,00796 \text{ г.}$$

Суммарный износ образцов трения I_{c2} :

$$I_{c2} = I_1 \cdot 2 = 0,0159 \text{ г.}$$

Скорость изнашивания:

$$И = \frac{\rho V_{\Delta}}{t} = \frac{0,0159}{3} = 0,0053 \text{ г/ч.}$$

Обработку статистических данных шероховатостей образцов трения, полученных на экспериментальных смазочных композициях, проводили с помощью программы, представленной в приложениях 1, 2.

Результаты анализа данных о величине износа и интенсивности изнашивания образцов трения, полученных теоретически, показали, что образцы трения, работавшие на базовом моторном масле Лукойл 15W-40, имеют износ и соответственно интенсивность изнашивания в 2,47 раза больше, чем образцы, работавшие на смазочной композиции, состоящей из моторного масла Лукойл 15W-40 и РЭД.

Результаты сравнения теоретических данных износа и скорости изнашивания трущихся деталей с результатами эксперимента представлены в виде гистограммы и графика на рисунках 4.12 и 4.13.

Анализ рисунков 4.12 и 4.13 показывает, что средний суммарный износ пар трения на моторном масле Лукойл 15W-40 в среднем в 2,47 раза больше, чем у образцов, испытанных на масле Лукойл 15W-40 с разработанной РЭД, что согласуется с результатами теоретических исследований. Сходимость экспериментальных и теоретических данных составила 88–92 %.

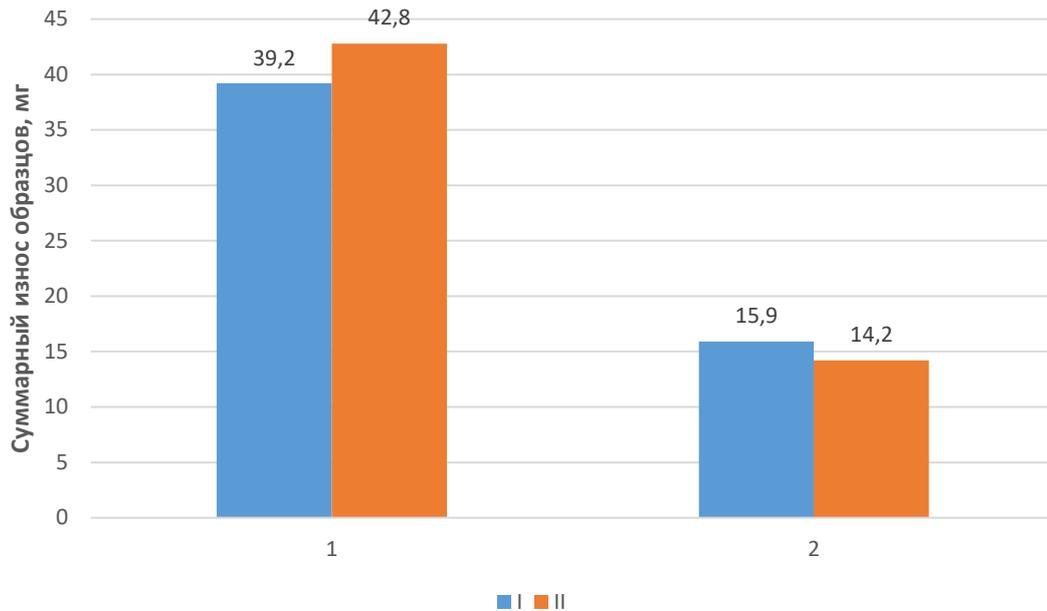


Рисунок 4.12 – Суммарный износ образцов трения, работавших на смазочных материалах: 1 – Лукойл 15W-40; 2 – Лукойл 15W-40 + РЭД; I – теоретические данные; II – экспериментальные данные

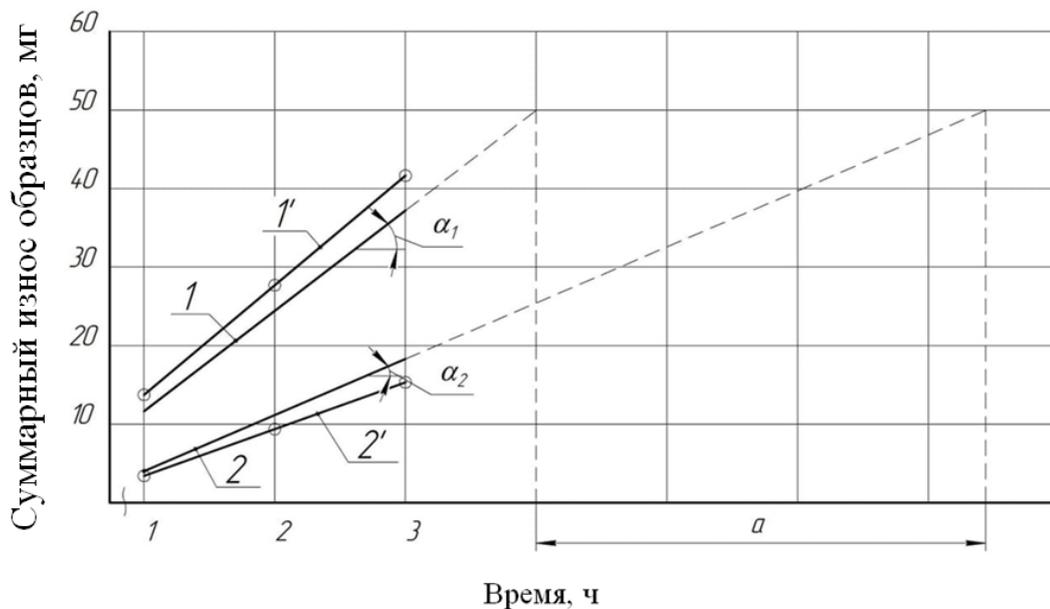


Рисунок 4.13 – Прогнозирование увеличения ресурса трущихся сопряжений, работавших на смазочных материалах: 1 – Лукойл 15W-40 (1' – по теоретическим данным; 2 – Лукойл 15W-40 + РЭД (2' – по экспериментальным данным)

Уменьшение величины износа трущихся деталей должно привести к увеличению их ресурса. Это можно наглядно продемонстрировать при сравнении кривых износа двух деталей по времени, работающих с экспериментальными смазочными материалами и имеющими различные скорости изнашивания, характеризуемые углом наклона α .

Увеличение ресурса сопряжения составит величину a (см. рисунок 4.13).

Анализ теоретических расчетов и данных, полученных в ходе эксперимента, позволяет сделать вывод о том, что выведенные в работе формулы (2.80), (2.83) дают возможность определить сходимость экспериментальных и теоретических данных износа трущихся деталей I , а также скорость их изнашивания $И$. В результате было установлено, что сходимость экспериментальных и теоретических данных износа трущихся деталей составила 88–92 %.

4.5 Результаты исследования морфологии поверхностей трения

Известно, что каждому сочетанию металлов пар трения, режиму работы и свойств окружающей среды соответствуют определенная совокупность и характер образования вторичных структур, определяющих в конечном итоге формирование сил трения и величину износа. Образование вторичных структур происходит в результате одновременного протекания процессов деформации, диффузии веществ из окружающей среды и химических реакций. Эти процессы приводят к изменению химического состава и структурного состояния поверхностных слоев металлов. Износостойкость металла в значительной степени зависит от состава и свойств вторичных структур на поверхности трения.

Наличие вторичных структур и продуктов физико-химического взаимодействия смазочной среды с металлами образцов трения обнаруживают на трущихся поверхностях деталей уже при рассмотрении невооруженным глазом или в микроскопе при небольшом увеличении.

В связи с этим для объяснения результатов трибологических испытаний пар трения на базовом масле Лукойл 15W-40 с содержанием РЭД и без нее исследовали морфологию поверхностных слоев образцов, сформированных данными смазочными материалами.

Морфологию и химический элементный состав поверхности трения образцов, сформированной под действием предлагаемого состава РЭД, изучали в лаборатории диагностики наноматериалов и структур Образовательно-научного института наноструктур и биосистем Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского с использованием автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа MIRA 2 LMU фирмы Tescan, оснащенного системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350.

В результате проведённых исследований получены изображения морфологии поверхности во вторичных (SE) электронах.

На рисунке 4.14 приведены микрофотографии поверхностей образцов, испытанных на базовом масле Лукойл 15W-40 с предлагаемой РЭД и без нее.

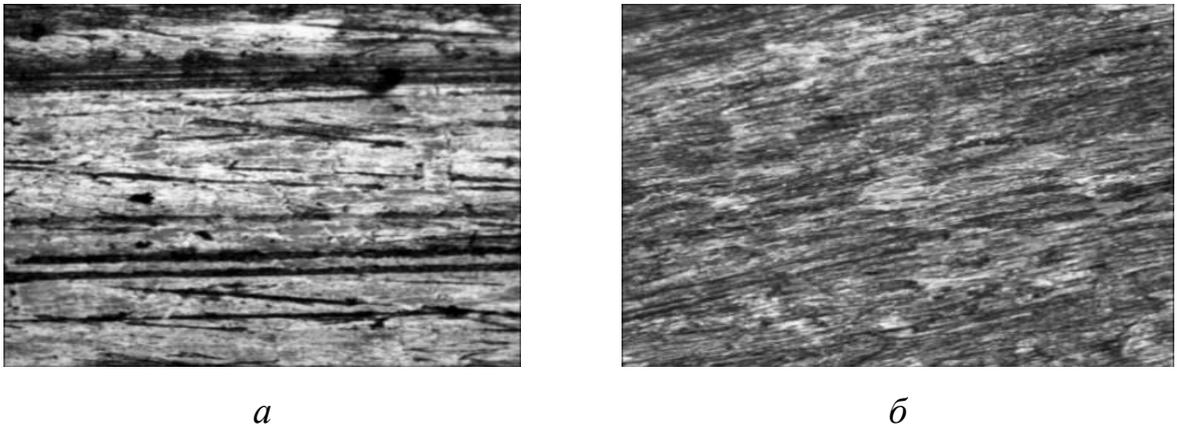


Рисунок 4.14 – Поверхности трения образцов, испытанных на смазочных материалах: *а* – Лукойл 15W-40; *б* – Лукойл 15W-40 + РЭД ($\times 50$)

На представленных фотографиях отчетливо видны отличия в рельефе поверхностей трения в зависимости от вида смазочного материала, что свидетельствует о различии в химическом составе поверхностных слоев.

Рассматривая поверхность трения колодки испытываемой пары трения после испытания на базовом моторном масле Лукойл 15W-40 (см. рисунок 4.14, *а*), можно заключить, что рабочие участки имеют строение без видимых пленок органического происхождения вторичных структур. Отсутствие защитной пленки приводит к непосредственному контакту металлических поверхностей при трении, что вызывает значительные разрушения. На поверхности трения образцов, испытанных на масле Лукойл 15W-40, наблюдаются дорожки трения и ярко выражены дефекты в виде коррозионных язв. Обнаружены также следы задиров и глубокие царапины.

Высокая плотность узких и коротких царапин, имеющих преимущественную направленность, вызвана, очевидно, усталостным выкрашиванием и последующим абразивным действием частиц более твердых, чем матрица материала, трущихся деталей. Появление царапин на образцах трения может быть также результатом абразивного воздействия частиц продуктов износа и твердых частиц загрязнений.

При рассмотрении поверхности трения образцов, испытанных на базовом масле Лукойл 15W-40 с РЭД (см. рисунок 4.14, *б*), в поле зрения оптического микро-

скопа на общем сером фоне хорошо видны участки новообразований, суммарная площадь которых составляет 60–80 % от общей площади трущейся поверхности. Характерно, что наблюдаемые участки пленки начинают формироваться в наиболее нагруженных местах поверхностей трения, вызванных повышенной шероховатостью, или в зонах поверхностных дефектов. Кроме того, на поверхности трения образцов, испытанных на масле Лукойл 15W-40 с РЭД, видны последствия интенсивного пластического течения металла, приводящего к сокрытию поверхностных дефектов и образованию сглаженного микрорельефа. Этому способствуют элементы, входящие в состав добавки, отличающиеся высокой пластичностью.

Механизм действия разработанной добавки основан, во-первых, на способности ультра- и наноразмерных порошкообразных компонентов заполнять микровпадины и микродефекты трущихся поверхностей, увеличивая тем самым фактическую площадь контакта, а во-вторых, на способности компонентов добавки участвовать в процессах формирования на рабочих поверхностях деталей слоя с улучшенными трибологическими характеристиками. В результате на поверхностях трения создаётся модифицированный слой с высокими антифрикционными и противоизносными свойствами, предохраняющий материал детали от изнашивания [126].

4.6 Результаты определения восстановительного эффекта ремонтно-эксплуатационной добавки к маслу

Результаты трибологических испытаний смазочной композиции, содержащей разработанную РЭД, представленные ранее, показали, что ее применение позволяет не только существенно улучшить противоизносные свойства моторного масла Лукойл 15W-40, но и реализовать восстановительный эффект изношенных поверхностей трущихся деталей. Так, в результате работы пары трения «ролик – колодка» в течение 3 ч с использованием в качестве смазочной среды моторного масла Лукойл 15W-40 с добавлением разработанной РЭД был отмечен прирост массы колодок.

Для исследования восстановительного эффекта разработанной РЭД к моторному маслу был проведен эксперимент на машине трения СМЦ-2 по методике и при режимах, представленных в главе 3. Продолжительность испытания на машине трения составила 9 ч.

На экспериментальных колодках пар трения были выполнены искусственные дефекты в виде отверстий диаметром 0,4 мм и глубиной 3 мм (рисунок 4.15).

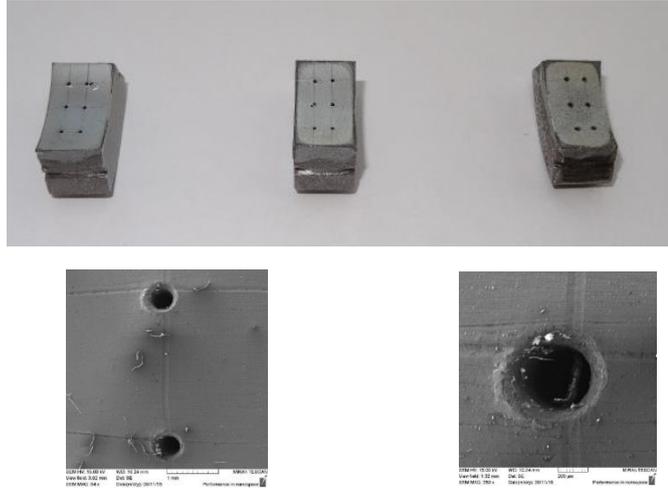


Рисунок 4.15 – Искусственные дефекты на поверхности трения колодки

После 9 ч работы пары трения «ролик – колодка» произошло как бы «заплавление» поверхностных дефектов на колодки (рис. 4.16).

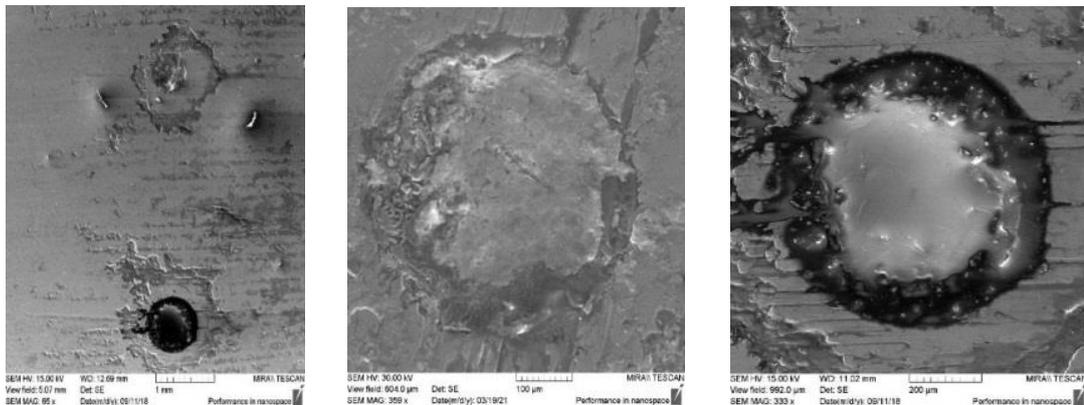


Рисунок 4.16 – Поверхностные дефекты образца трения, восстановленные под воздействием разработанной добавки к моторному маслу ($\times 500$)

Исследование химического состава поверхностной пленки, сформированной на трущихся деталях под действием разработанной РЭД, проводили в лаборатории диагностики наноматериалов и структур Образовательно-научного института наноструктур и биосистем Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского с использованием автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа MIRA 2 LMU фирмы Tescan.

Первоначальному анализу подвергали образец перед испытанием на машине

трения (рисунок 4.17).

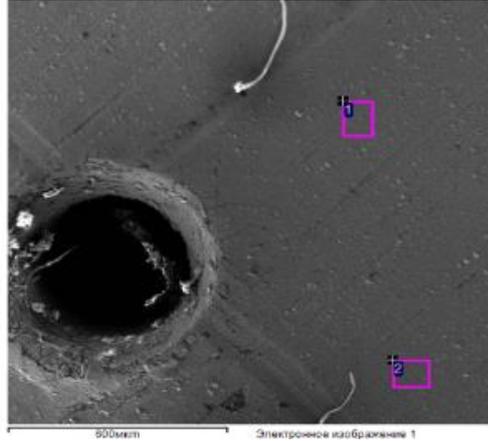


Рисунок 4.17 – Поверхность образца трения с искусственным дефектом перед испытанием ($\times 500$)

Содержание химических элементов на поверхности образца до испытания, определенные с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа MIRA 2 LMU, представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Содержание химических элементов в поверхностном слое образцов до испытания

Химический элемент	Содержание в поверхностном слое, % по массе	
	1-я точка	2-я точка
С	17,80	18,29
О	2,09	2,70
Fe	80,11	79,01
Итого	100,0	100,0

Как видно из таблицы 4.3, в поверхностном слое образца пары трения в основном присутствует железо (Fe) как основной компонент материала, из которого изготовлена экспериментальная деталь – колодка.

Элемент поверхности трения и результаты исследования содержания химических элементов на поверхности образца, работавшего на смазочной композиции, состоящей из смеси моторного масла Лукойл 15W-40 и разработанной до-бавки, представлены на рисунке 4.18 и в таблице 4.4.

Электронное изображение 1

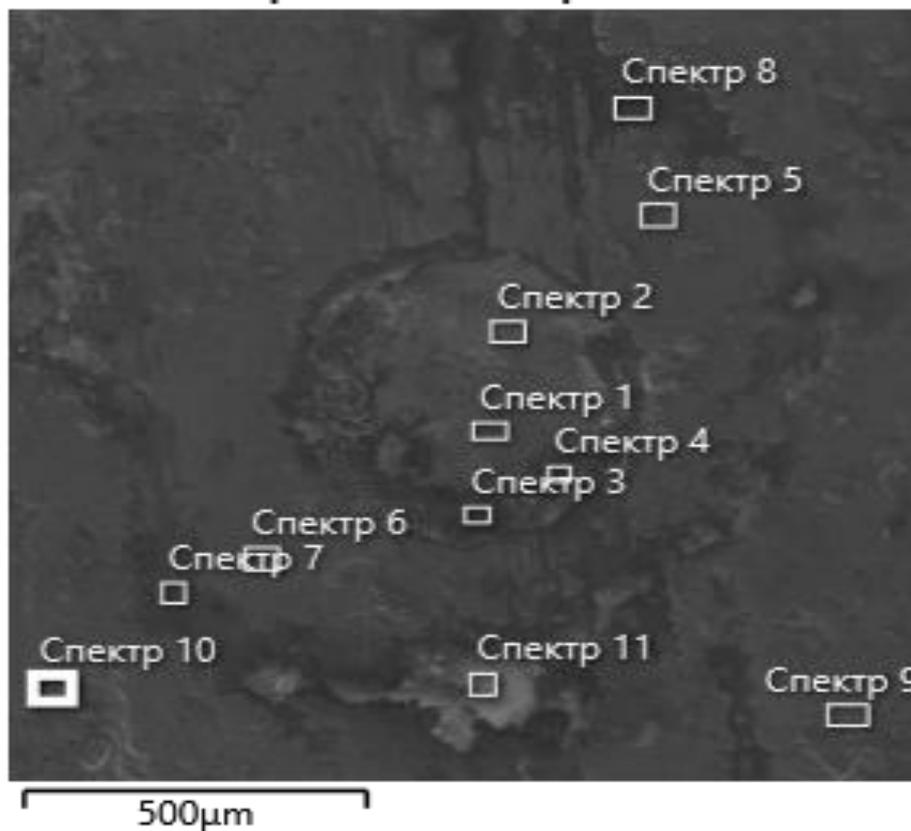


Рисунок 4.18 – Поверхность образца трения с искусственным дефектом после испытания ($\times 500$)

Таблица 4.4 – Содержание химических элементов в поверхностном слое образца трения после испытания

Химический элемент	Содержание в поверхностном слое, % по массе										
	спектр 1	спектр 2	спектр 3	спектр 4	спектр 5	спектр 6	спектр 7	спектр 8	спектр 9	спектр 10	спектр 11
C	16,68	18,10	28,83	38,21	25,69	12,39	25,31	26,16	29,17	30,44	30,08
O	8,88	8,05	14,00	16,10	7,51	6,27	14,14	15,10	19,79	25,34	17,21
Si	0,15	0,21	–	–	1,65	1,49	–	–	0,33	0,61	–
P	–	–	7,33	6,81	0,55	0,33	5,51	7,28	2,17	1,07	8,02
S	0,44	0,37	5,99	5,73	1,48	0,74	7,08	7,13	6,55	2,63	6,42
K	0,20	0,13	0,04	–	0,13	0,12	–	–	0,11	0,32	–
Ti	0,55	0,66	0,06	–	0,87	1,18	–	–	1,43	2,55	–
Fe	1,10	0,84	3,10	2,58	71,64	74,87	9,26	9,24	6,68	14,38	6,61
Cu	57,00	59,51	32,61	25,20	4,66	2,09	33,91	28,85	27,18	18,04	26,77
Zn	15,01	12,14	8,04	5,38	1,11	0,53	4,78	6,24	6,59	4,64	7,88
Итого	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Из таблицы 4.4 видно, что наряду с основным химическим элементом – Fe, со-

держась в материале, из которого изготовлен образец, выявлены также компоненты порошкообразных добавок, применяемых в смазочных материалах, 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 (спектры 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 11), чем других местах, а в точках непосредственного контакта трущихся образцов их содержание минимально (спектры 5, 6, 10).

Механизм действия предлагаемой добавки основан на способности ультра- и наноразмерного порошка легированной латуни заполнять микровпадины и микродефекты трущихся поверхностей, увеличивая тем самым фактическую площадь контакта. При попадании мелкодисперсных частиц в зону фактического контакта образцов под действием высоких температур происходит их взаимодействие с поверхностями трения. Это приводит к образованию островковой поверхностной пленки, которая заполняет или заплавляет наружные дефекты и создает ровную трущуюся поверхность.

Компоненты добавки спрессовываются или заплавляются во впадинах между выступами шероховатости поверхности трения контактирующих деталей. В результате уменьшается шероховатость поверхности трения, увеличивается реальная площадь контакта и, как следствие, снижаются фактические контактные давления. Когда впадины шероховатости поверхности заполнены, дальнейшее увеличение толщины слоя поверхностной пленки может происходить под влиянием адгезионного взаимодействия. Благодаря последнему, образованный поверхностный слой прочно связывается с подложкой основного материала, причем шероховатость поверхности усиливает эту связь.

Результаты анализа морфологии поверхностей трения подтверждают данные испытаний на износостойкость образцов, которые показывают, что наиболее эффективной является смазочная композиция, приготовленная с использованием

добавок, содержащих ультрадисперсные порошки ПТК, интеркалированные цинком (Zn), а также нанопорошок легированной латуни. Они способствуют модификации поверхностного слоя трущихся деталей компонентами добавок. В результате поверхностный слой приобретает лучшие противозносные свойства по сравнению с базовым маслом Лукойл 15W-40.

Из вышеизложенного можно сделать заключение о том, что в процессе испытания пары трения, смазываемой трибосоставом, состоящим из смеси моторного масла Лукойл 15W-40 и разработанной РЭД, на поверхности фрикционного взаимодействия формируется дискретная пленка, включающая в себя частицы ультра- и наноразмерного порошка, входящего в состав разработанной добавки. За счет слоистой структуры компонента добавки полититаната калия сформированная пленка характеризуется низким сопротивлением деформации сдвига, что вызывает снижение момента трения и температуры в паре «диск – колодка» по сравнению с моторным маслом Лукойл 15W-40 без добавки. Наноразмерный порошок легированной латуни снижает скорость изнашивания трущихся поверхностей и оказывает восстановительное воздействие на поверхностные дефекты контактирующих деталей.

4.7 Результаты сравнительных стендовых испытаний смазочной композиции в двигателе КАМАЗ-7403.10

Эффективность предлагаемой смазочной композиции оценивали по следующим критериям:

- величине износа основных деталей КШМ (гильз цилиндров, поршневых колец, шатунных и коренных вкладышей, шатунных и коренных шеек коленчатого вала, распределительного вала);
- степени влияния на основные технические характеристики двигателей (расход картерных газов; удельный расход топлива, дымность отработавших газов и т. д.).

Результаты испытаний представлены в таблицах 4.5 и 4.6.

Таблица 4.5 – Основные технико-эксплуатационные параметры двигателя, отработавшего на моторном масле Лукойл 15W-40 без добавки

Параметр	Ед. измерения	Наработка, мото-ч			Значение по ТУ 7403.1000018
		50	1000	1250	
Номинальная мощность брутто	л. с./кВт · ч	262/357	258/352	258/352	260
Номинальная частота вращения	мин ⁻¹	2600	2600	2600	2600±50
Максимальный крутящий момент	кг · м	83	84	84	80
Частота вращения, соответствующая максимальному крутящему моменту	мин ⁻¹	1800	1800	1800	1600...1800
Частота вращения холостого хода	мин ⁻¹				
максимальная		2860	2860	2860	2930±80
минимальная		600	600	600	600±50
Удельный эффективный расход топлива	г/л. с. · ч				
минимальный		157,5	159,3	160,2	155 + 5 %
при номинальной мощности		176,1	178,8	179,5	175 + 3 %
Давление масла в системе смазки	кг/см ²				
при 600 мин ⁻¹		3,0	2,1	2,0	1,0 min
при 2600 мин ⁻¹		5,1	5,1	5,0	4,0...5,5
Расход масла на угар по отношению к расходу топлива на номинальном режиме	%	0,5	0,6	0,6	0,8 max
Дымность отработавших газов	%				см. ГОСТ 17.2.2.01-84
по ВСХ* при 1400 мото-ч		24,0	23,0	23,0	
на режиме разгона		23,0	25,0	26,0	
Общая наработка двигателя	мото-ч	1068			

*ВСХ – внешняя скоростная характеристика.

Мощность и крутящий момент приведены к стандартным условиям в соответствии с ГОСТ 14846-81 [36]. Согласно ГОСТ 14846-81, допускается отклонение приведенных значений мощности и крутящего момента от указанных в ТУ значений в пределах ±5 %.

Таблица 4.6 – Основные технико-эксплуатационные параметры двигателя, отработавшего на моторном масле Лукойл 15W-40 + РЭД

Параметр	Ед. измерения	Наработка, мото-ч			Значение по ТУ 7403.1000018
		50	1000	1250	
Номинальная мощность брутто	л. с./кВт · ч	262/357	258/352	260/354	260
Номинальная частота вращения	мин ⁻¹	2600	2600	2600	2600±50
Максимальный крутящий момент	кг · м	83	84	86	80
Частота вращения, соответствующая максимальному крутящему моменту	мин ⁻¹	1800	1800	1800	1600...1800
Частота вращения холостого хода	мин ⁻¹				
максимальная		2860	2880	2900	2930±80
минимальная		600	600	580	600±50
Удельный эффективный расход топлива	г/л. с. · ч				
минимальный		158,2	160,4	158,8	155 + 5 %
при номинальной мощности		176,8	179,5	178,1	175 + 3 %
Давление масла в системе смазки	кг/см ²				
при 600 мин ⁻¹		2,8	2,2	2,4	1,0 min
при 2600 мин ⁻¹		5,1	5,0	5,2	4,0...5,5
Расход масла на угар по отношению к расходу топлива на номинальном режиме	%	0,5	0,6	0,5	0,8 max

Дымность отработавших газов	%				см. ГОСТ 17.2.2.01-84
по ВСХ* при 1400 мото-ч		24,0	23,0	22,0	
на режиме разгона		23,0	25,0	24,0	
Общая наработка двигателя	мото-ч	1068			

*ВСХ – внешняя скоростная характеристика.

Мощность и крутящий момент приведены к стандартным условиям в соответствии с ГОСТ 14846-81 [36]. Согласно ГОСТ 14846-81, допускается отклонение приведенных значений мощности и крутящего момента от указанных в ТУ значений в пределах $\pm 5\%$.

Результаты испытаний показали, что испытываемые двигатели по основным технико-экономическим параметрам соответствуют ТУ 7403.1000018, ГОСТ РВ 15307-2002, ГОСТ 14846-81 и отвечают требованиям по дымности согласно ГОСТ 17.2.2.01-84.

По номинальной мощности, максимальному крутящему моменту, максимальной частоте вращения холостого хода, удельному эффективному расходу топлива, давлению масла в системе смазки, расходу масла на угар, дымности отработавших газов двигатель, отработавший на масле Лукойл 15W-40 с разработанной РЭД, оказался эффективнее двигателя, отработавшего на базовом масле Лукойл 15W-40. Разница этих показателей составила 1–12 %. Наибольший эффект от применения разработанной добавки был достигнут у таких параметров, как давление масла в системе смазки и расход масла на угар (10–12 %).

По результатам осмотра в отношении качества приработки основных узлов и деталей экспериментальных двигателей по окончании 50 мото-ч испытаний замечаний не было.

Результаты микрометража основных деталей КШМ (в том числе ЦПГ) экспериментальных двигателей после 1000 и 1250 мото-ч испытаний представлены в таблице 4.7 и на рисунках 4.19–4.24.

Из рисунка 4.19 видно, что средняя величина износа гильз цилиндров двигателей, испытанных на моторном масле Лукойл 15W-40, в 1,37 раза больше, чем у двигателей, работавших на базовом моторном масле с РЭД.

График износа гильз цилиндров дизелей по длине представлен на рисунке 4.20. Его анализ показывает, что наибольший износ рабочей поверхности гильз цилиндров для всех испытываемых дизелей наблюдается в первом поясе, на расстоянии 18 мм от верхнего торца гильзы. При использовании разработанной добавки, во-первых, уменьшился износ гильз цилиндров двигателей во всех поясах по сравнению с базовым маслом Лукойл 15W-40, во-вторых, начиная с 9-го и до по-

следнего 12-го пояса наблюдался восстановительный эффект. В этих поясах размер гильз цилиндров уменьшился, а не увеличился, как у гильз цилиндров дизелей, работавших с базовым маслом Лукойл 15W-40.

Таблица 4.7 – Величина износа основных деталей экспериментальных двигателей после 1000 и 1250 мото-ч испытаний

Параметр	Износ деталей ДВС, мкм			
	после 1000 мото-ч		после 1250 мото-ч	
	1-й двигатель	2-й двигатель	1-й двигатель	2-й двигатель
<i>l</i>	2	3	4	5
Диаметр гильзы цилиндров на расстоянии от верхнего торца				
1-й пояс – 18 мм	38,4	40,0	55,4	49,2
2-й пояс – 25 мм	32,0	32,8	48,7	45,7
3-й пояс – 37 мм	28,8	27,2	46,5	37,6
4-й пояс – 50 мм	24,0	24,8	41,8	34,5
5-й пояс – 65 мм	24,0	23,2	37,8	29,8
6-й пояс – 85 мм	19,2	20,0	33,4	28,6
7-й пояс – 100 мм	14,4	15,2	32,4	26,5
8-й пояс – 120 мм	11,2	12,0	28,5	22,5
9-й пояс – 145 мм	2,4	3,2	22,8	11,2
10-й пояс – 170 мм	1,6	1,6	21,2	–4,5
11-й пояс – 190 мм	0,8	0,8	12,7	–8,6
12-й пояс – 215 мм	0	0	8,8	–14,5

Окончание табл. 4.7

<i>l</i>	2	3	4	5
Радиальная толщина поршневого кольца				
1-го компрессионного	28,8	29,6	35,2	27,4
2-го компрессионного	26,3	25,7	32,7	24,5
маслосъемного	20,8	18,5	28,5	18,3
Диаметр шеек коленчатого вала				
коренных	7,2	8,8	9,8	8,57
шатунных	10,5	9,2	11,6	5,12
Толщина коренных вкладышей				
верхних	46,7	45,9	58,4	48,5
нижних	46,2	45,6	58,8	47,9
Толщина шатунных вкладышей				
верхних	35,4	34,8	43,5	34,9
нижних	35,1	34,4	43,3	34,7
Распределительный вал				
размер кулачков в плоскости вершины профиля	56,8	57,1	73,8	61,2
диаметр опорных шеек	95,6	95,8	114,5	101,2

Примечания. 1-й двигатель – базовое масло Лукойл 15W-40 без добавки; 2-й двигатель – масло Лукойл 15W-40 с предлагаемой добавкой.

Предельно допустимая величина износа не оговорена программой-методикой 7403.3902 030ПМ.

Знаком «минус» отмечен рост размера для охватываемых поверхностей (валов) и уменьшение размера для охватывающих поверхностей (отверстий).

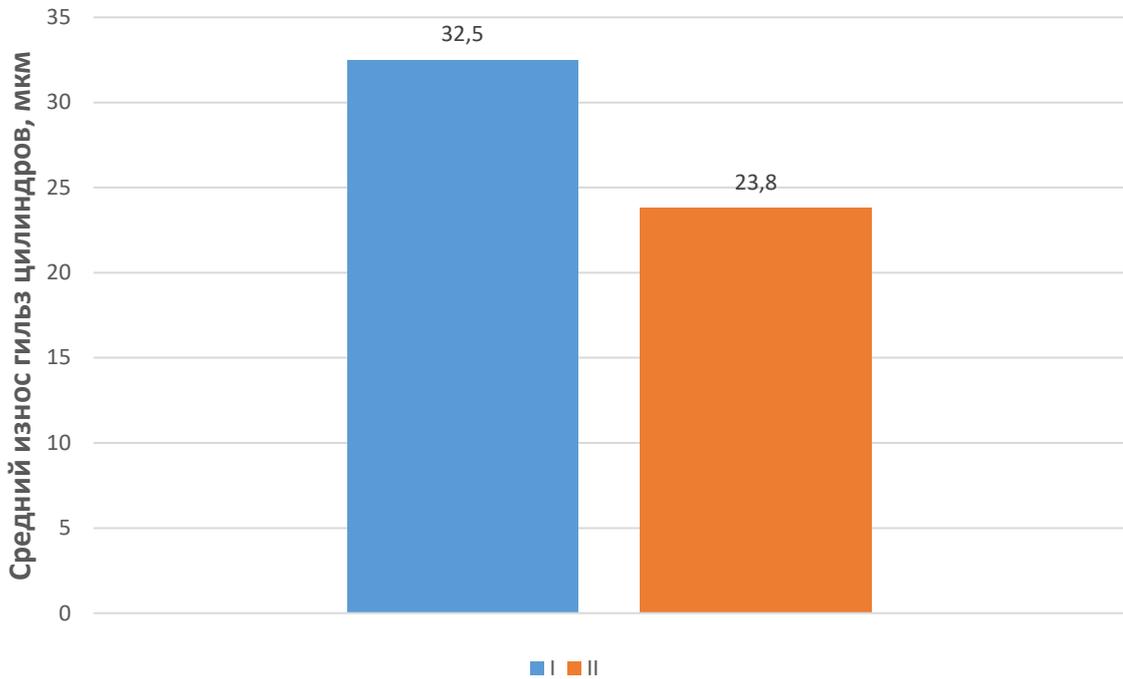


Рисунок 4.19 – Средняя величина износа гильз цилиндров двигателей, испытанных на моторном масле: I – Лукойл 15W-40; II – Лукойл 15W-40 + РЭД

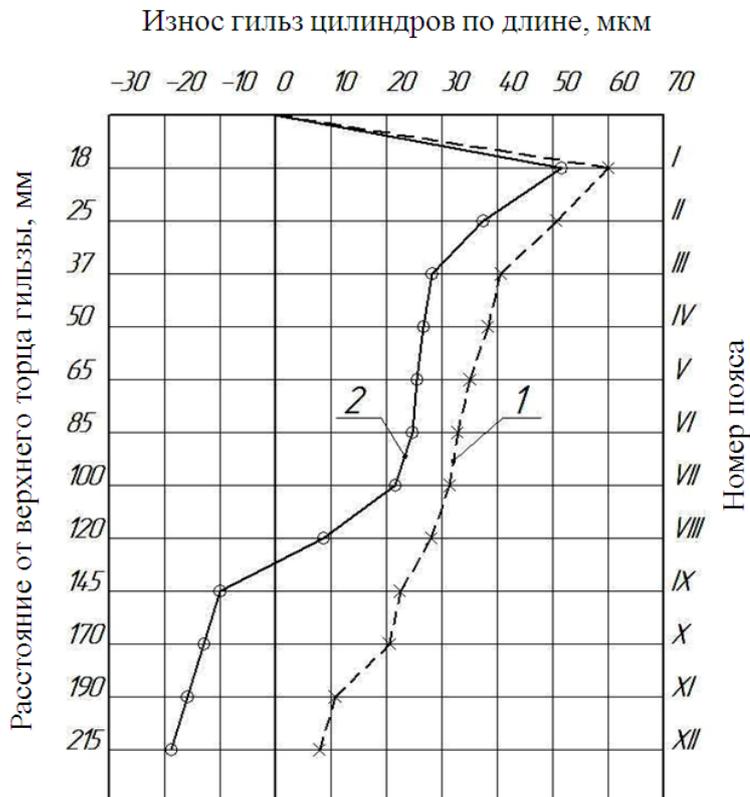


Рисунок 4.20 – Изменение величины износа гильз цилиндров по длине рабочей поверхности двигателей, испытанных: 1 – на моторном масле Лукойл 15W-40; 2 – Лукойл 15W-40 + РЭД

Результаты микрометража компрессионных и маслосъёмных колец экспериментальных дизелей представлены в виде гистограмм на рисунке 4.21. Их анализ показывает, что износ поршневых колец двигателей, испытанных на моторном масле Лукойл 15W-40 с разработанной добавкой меньше по сравнению с поршневыми кольцами двигателей, испытанных на базовом масле Лукойл 15W-40: первого компрессионного кольца – в 1,28 раза; второго компрессионного кольца – в 1,33 раза; маслосъёмного кольца – 1,56 раза.

Результаты микрометража коренных и шатунных вкладышей коленчатых валов экспериментальных двигателей представлены в виде гистограмм на рисунке 4.22.

Анализ показал, что средняя величина износа коренных вкладышей двигателя, работавшего на моторном масле Лукойл 15W-40 с предлагаемой добавкой, в 1,22 раза, а шатунных вкладышей – в 1,25 раза меньше, чем у двигателя, работавшего на базовом масле Лукойл 15W-40.

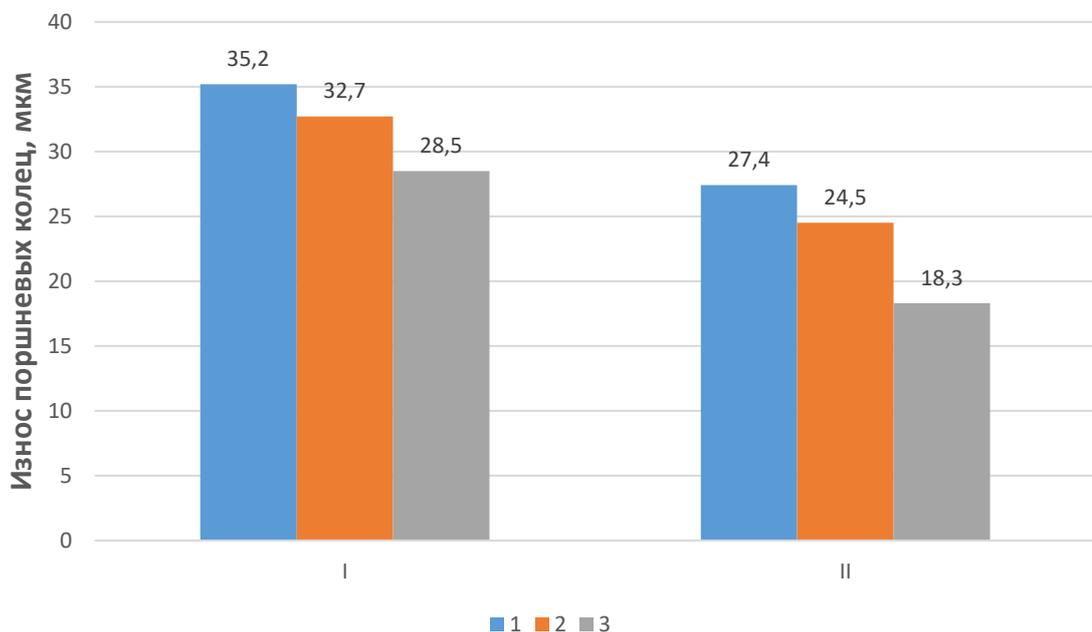


Рисунок 4.21 – Износ поршневых колец двигателей, испытанных: *I* – на моторном масле Лукойл 15W-40; *II* – Лукойл 15W-40 + РЭД; 1 – первое компрессионное кольцо; 2 – второе компрессионное кольцо; 3 – маслосъёмное кольцо

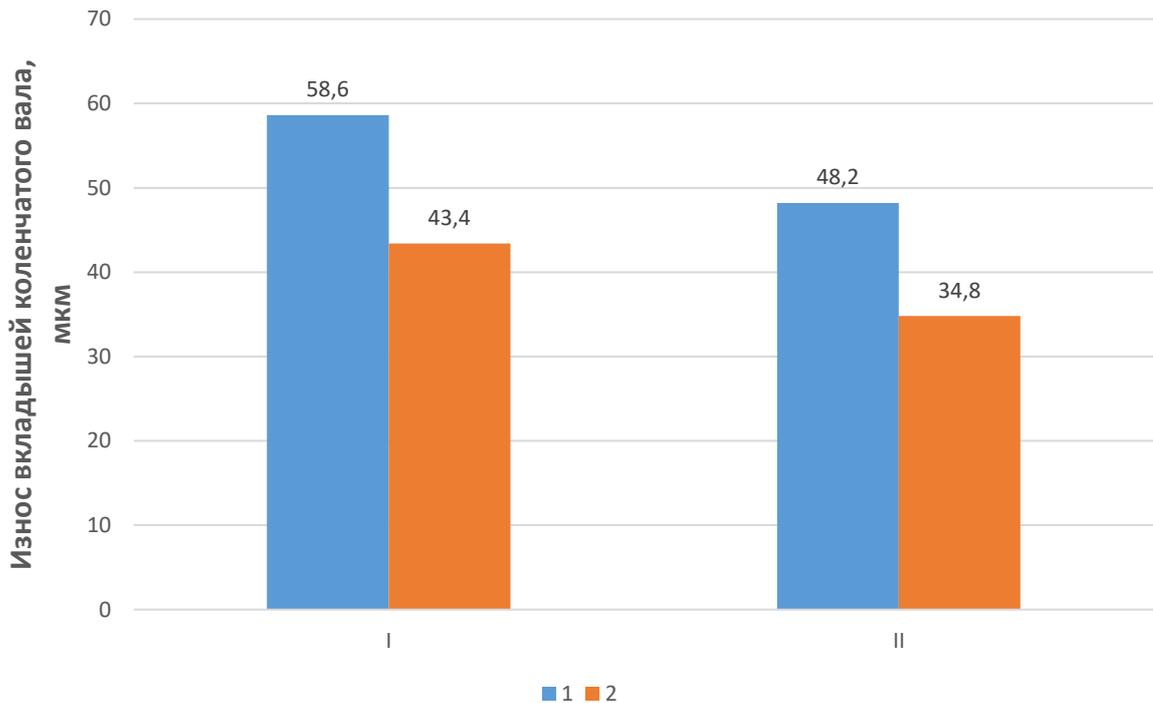


Рисунок 4.22 – Износ коренных (I) и шатунных (2) вкладышей коленчатых валов двигателей, испытанных: I – на моторном масле Лукойл 15W-40; II – Лукойл 15W-40 + РЭД

Результаты микрометража коренных и шатунных шеек коленчатых валов экспериментальных двигателей представлены в виде гистограмм на рисунке 4.23. Их анализ показал, что средняя величина износа коренных шеек коленчатого вала двигателя, работавшего на моторном масле Лукойл 15W-40 с ремонтно-эксплуатационной добавкой, в 1,14 раза, а шатунных шеек – в 2,3 раза меньше по сравнению с двигателем, работавшим на базовом масле Лукойл 15W-40.

Результаты микрометража кулачков и опорных шеек распределительных валов экспериментальных двигателей представлены в виде гистограмм на рисунке 4.24.

Анализ результатов замера и определения износов кулачков и опорных шеек распределительных валов экспериментальных двигателей показал, что применение разработанной РЭД к моторному маслу Лукойл 15W-40 привело к снижению средней величины износа кулачков в 1,21 раза, а опорных шеек распределительного вала – в 1,13 раза по сравнению величинами износа аналогичных деталей двигателя, работавшего на базовом масле Лукойл 15W-40.

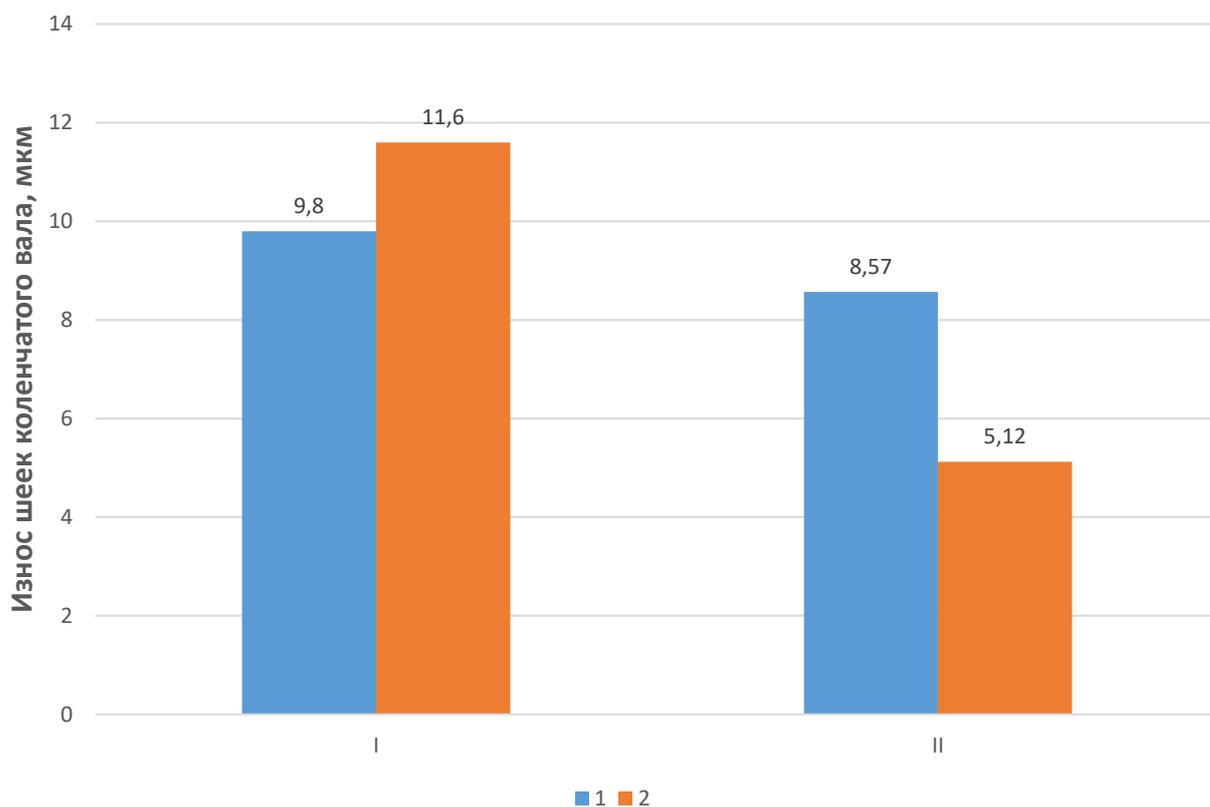


Рисунок 4.23 – Износ коренных (1) и шатунных (2) шеек коленчатых валов двигателей, испытанных: I – на моторном масле Лукойл 15W-40; II – Лукойл 15W-40 + РЭД

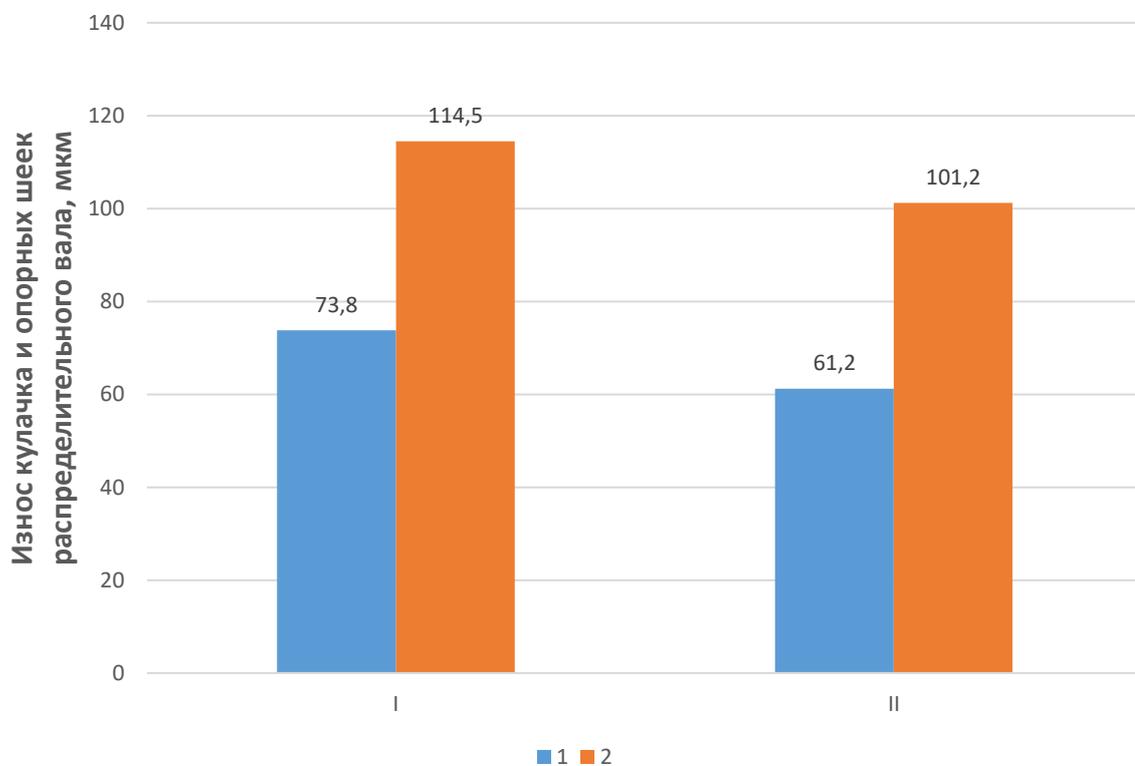


Рисунок 4.24 – Износ кулачков (1) и опорных шеек (2) распределительных валов двигателей, испытанных: I – на моторном масле Лукойл 15W-40; II – Лукойл 15W-40 + РЭД

Результаты проведенных стендовых испытаний экспериментальных двигателей на износ основных деталей КШМ наглядно показали эффективность применения разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки. Ее использование привело к снижению износа основных деталей КШМ двигателя КАМАЗ-7403.10-260 в 1,21–2,3 раза.

4.8 Результаты эксплуатационных испытаний двигателей КАМАЗ 7403.10 с экспериментальными смазочными композициями

Эксплуатационные испытания автомобилей КАМАЗ, укомплектованных двигателями КАМАЗ 7403.10-260, с экспериментальными смазочными композициями проводили согласно методике, представленной в главе 3.

Разработанная ремонтно-эксплуатационная добавка получила название «Кластер-В».

Результаты замеров компрессии в гильзах цилиндров контролируемых двигателей заносили в журнал наблюдений.

Начальную и предельную величины состояния ЦПГ выбирали из заводской технической документации. Средние значения параметров технического состояния ЦПГ представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Значения параметров технического состояния ЦПГ экспериментальных двигателей

Время проведения замеров	Компрессия в ЦПГ, МПа	
	двигателя, работавшего на масле Лукойл 15W-40	двигателя, работавшего на масле Лукойл 15W-40 с добавкой «Кластер-В»
Новый двигатель до обкатки	3,40	3,40
После прохождения периода приработки	3,60	3,60
После наработки t_k		
16,0...16,5 тыс. км + 225...227 тыс. км	3,38	3,42
32...33 тыс. км + 225...227 тыс. км	3,32	3,39
48,0...49,5 тыс. км + 225...227 тыс. км	3,25	3,37

«Остаточный ресурс двигателя, работавшего на предлагаемой смазочной композиции, после наработки t_k был определен по формуле» (3.2) [80].

Средний остаточный ресурс $t_{ост}$ после наработки t_k :

- двигателей, работавших на масле Лукойл 15W-40:

$$t_{\text{ост}} = 275500 \cdot \left[\left(\frac{|3,0 - 3,5| - 0,2}{3,25 - 3,5 - 0,2} \right)^{1/1,3} - 1 \right] = 68104 \text{ км};$$

- двигателей, работавших на масле Лукойл 15W-40 с добавкой «Кластер-В»:

$$t_{\text{ост}} = 271580 \cdot \left[\left(\frac{|3,0 - 3,5| - 0,20}{3,37 - 3,5 - 0,20} \right)^{1/1,3} - 1 \right] = 123948 \text{ км}.$$

Зависимость компрессии в ЦПГ от пробега экспериментальных автомобилей КАМАЗ-7403.10 представлена на рисунке 4.25.

Результаты проведенных эксплуатационных испытаний экспериментальных двигателей КАМАЗ-7403.10-260 подтверждены соответствующими актами (приложение 12).

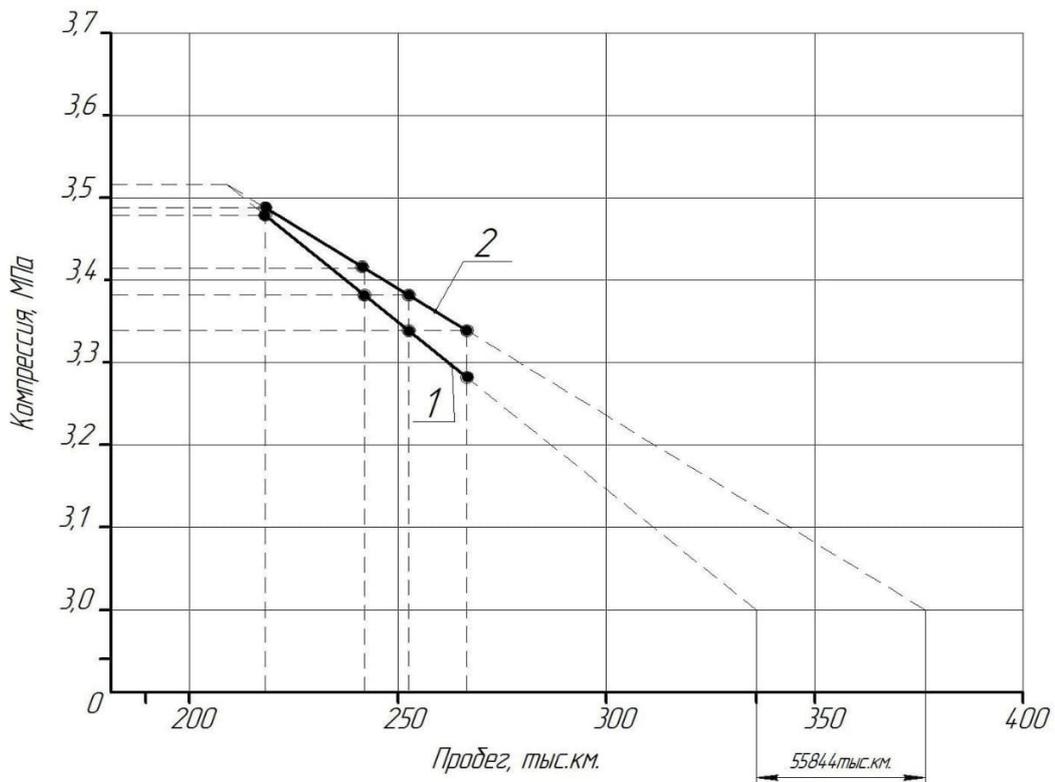


Рисунок 4.25 – Среднее значение остаточного ресурса сопряжения «поршневое кольцо – гильза» по результатам эксплуатационных испытаний двигателей КАМАЗ 7403.10, работавших: 1 – на масле Лукойл 15W-40; 2 – Лукойл 15W-40 + «Кластер-В»

Анализ результатов измерений компрессии ЦПГ в зависимости от наработки экспериментальных двигателей показал, что прогнозируемое увеличение остаточного ресурса двигателей, работающих на моторном масле Лукойл 15W-40 с разработанной 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. 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.

Таким образом, можно утверждать, что разработанная добавка «Кластер-В» позволяет существенно повысить долговечность сопряжения «поршневое кольцо – гильза» двигателей КАМАЗ в условиях эксплуатации. Очевидно, что долговечность сопряжений при использовании предлагаемой добавки на основе ультра- и наноразмерных компонентов увеличивается за счет снижения скорости изнашивания.

На основе результатов проведенных ранее лабораторных испытаний можно заключить, что снижение скорости изнашивания происходит за счет модифицирования рабочих поверхностей деталей компонентами добавки и образования слоя с улучшенными трибологическими характеристиками. В процессе трения контактирующих деталей формируется поверхностный слой, выполняющий роль своеобразного защитного экрана, препятствующего износу.

4.9 Результаты исследований изменения свойств моторных масел под действием ремонтно-эксплуатационной добавки

При определении эффективности разработанной добавки к моторному маслу немаловажным фактором является оценка влияния ее состава на физико-химические характеристики базового масла, что в конечном итоге скажется положительным или отрицательным образом на эксплуатационных характеристиках двигателя и сроке службы масла.

Для проведения данных исследований в лабораторных условиях в моторное масло Лукойл 15W-40 вносили добавку в концентрации по массе от 0,1 до 0,3 %.

Смесь нагревали до температуры 80 ± 5 °С и перемешивали в течение 10 мин лабораторной мешалкой.

Сначала определяли изменение вязкости базового моторного масла Лукойл 15W-40 в зависимости от концентрации предлагаемой ремонтно-эксплуатационной добавки. Результаты замеров представлены на рисунке 4.26.

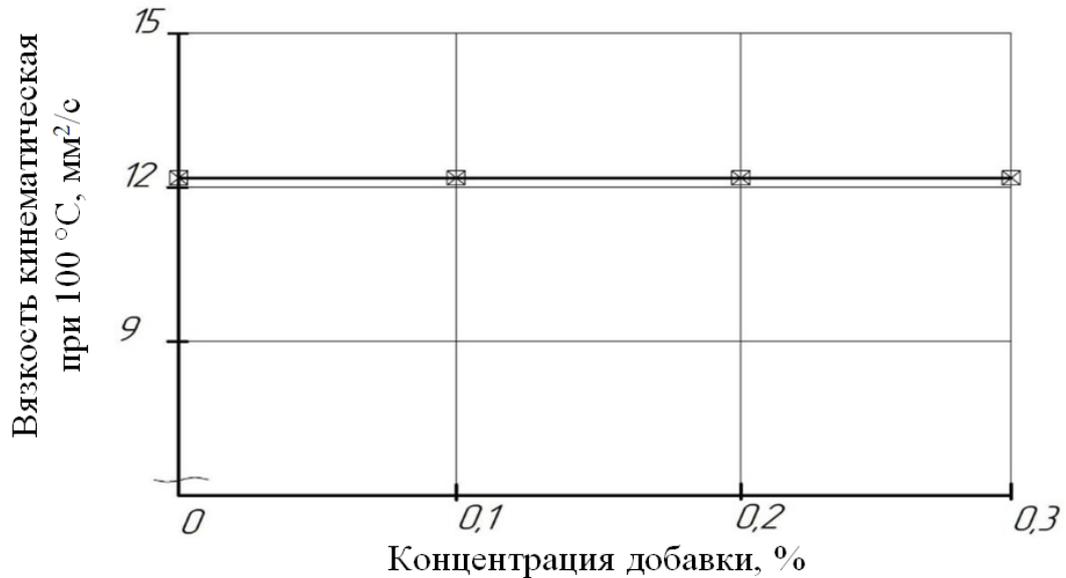


Рисунок 4.26 – Зависимость изменения вязкости кинематической моторного масла Лукойл 15W-40 от концентрации РЭД

Установлено, что внесение порошкообразной добавки в базовое моторное масло Лукойл 15W-40 практически не изменяет его вязкость кинематическую. Исходное значение этого показателя составило $12,9 \text{ мм}^2/\text{с}$, а после внесения $0,3 \%$ добавки он увеличился всего на $0,2 \text{ мм}^2/\text{с}$ и достиг $13,1 \text{ мм}^2/\text{с}$.

Затем оценивали влияние ремонтно-эксплуатационной добавки на изменение щелочного и кислотного чисел моторного масла Лукойл 15W-40. В результате было установлено, что внесение предлагаемого трибопрепарата в базовое моторное масло не влияет эти показатели (рисунок 4.27). Отмечено незначительное увеличение содержания механических примесей при концентрации РЭД $0,3 \%$ (рисунок 4.28).

В целом по результатам лабораторных исследований не установлено существенных изменений физико-химических свойств базового масла под действием разработанной порошкообразной добавки, свидетельствующих о возможном снижении его срока службы в процессе работы ДВС.

Далее проводили исследования влияния предлагаемой смазочной композиции на изменение физико-химических свойств базового моторного масла Лукойл 15W-40 в процессе эксплуатационных испытаний двигателей КАМАЗ 7403.10-260, установленных на автомобилях КАМАЗ 55-102.

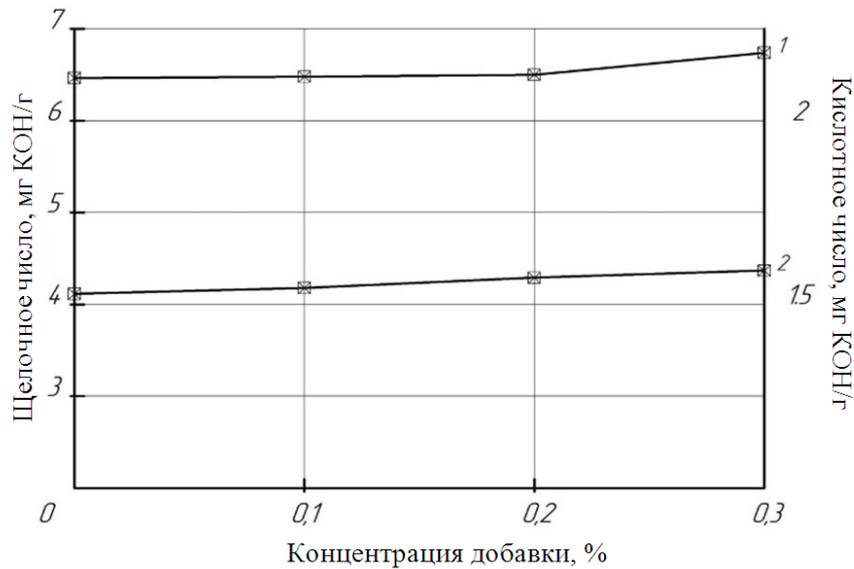


Рисунок 4.27 – Зависимость изменения щелочного (1) и кислотного (2) чисел моторного масла Лукойл 15W-40 от концентрации РЭД

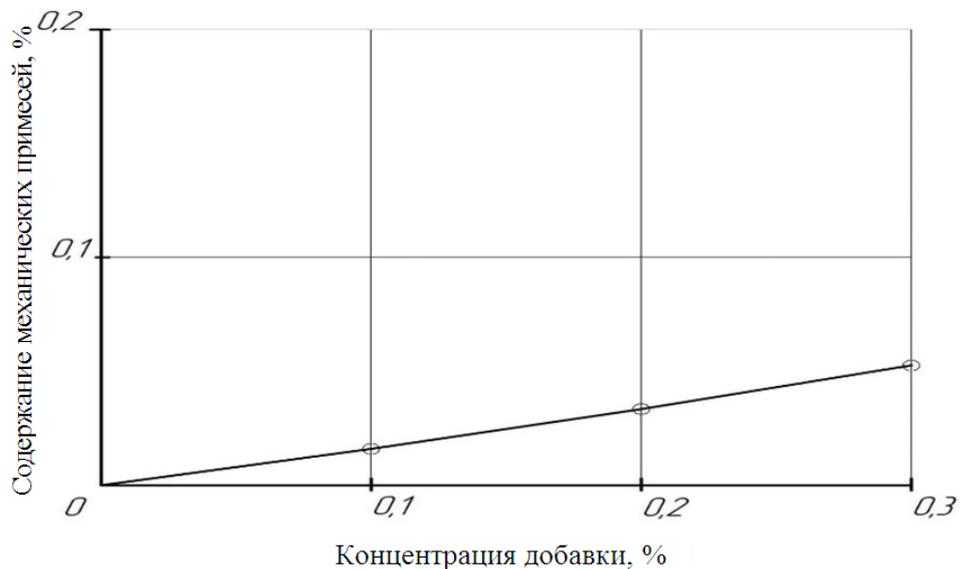


Рисунок 4.28 – Зависимость изменения содержания механических примесей в масле от концентрации, разработанной РЭД

Моторное масло Лукойл 15W-40 и предлагаемую смазочную композицию, состоящую из смеси базового моторного масла и разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки, заливали в экспериментальные двигатели автомобилей

КАМАЗ 55-102 после слива отработанного масла и промывки системы смазки.

В соответствии с методикой, представленной в 3-й главе, через каждые 5 тыс. км пробега автомобиля КАМАЗ 55-102 проводили отбор проб масла и их анализ в лабораторных условиях. Исследовали изменение вязкости, щелочного и кислотного чисел и содержания механических примесей.

На рисунке 4.29 представлена динамика изменения вязкости моторного масла Лукойл 15W-40 с добавкой «Кластер-В» и без нее в зависимости от пробега автомобилей КАМАЗ 55-102, укомплектованных двигателями КАМАЗ 7403.10.

Анализ рисунка 4.29 показал, что вязкость базового моторного масла Лукойл 15W-40 и моторного масла Лукойл 15W-40 с РЭД, находящихся в экспериментальных двигателях КАМАЗ 7403.10-260, после пробега автомобиля КАМАЗ 55-102 от 5 до 10 тыс. км увеличилась незначительно, а в интервале между 10 и 15 тыс. км пробега этот показатель стабилизировался и практически не изменялся.

Разница между изменением вязкости базового моторного масла Лукойл 15W-40 и моторного масла Лукойл 15W-40 с РЭД была незначительной. Величина этих изменений находится в пределах ошибки методов измерений.

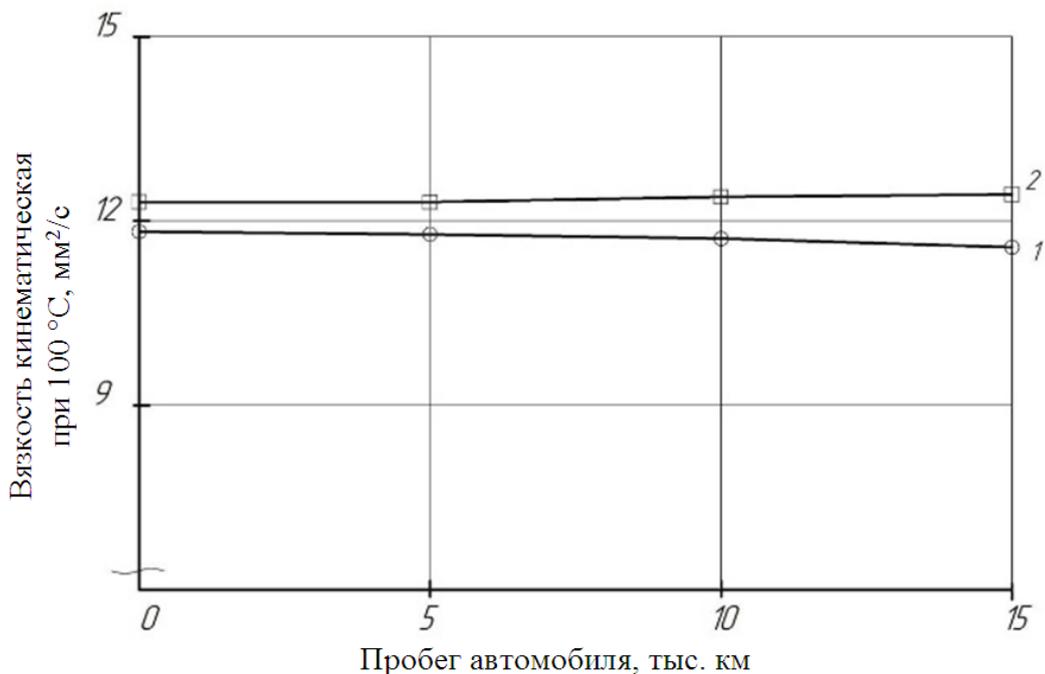


Рисунок 4.29 – Зависимость изменения вязкости базового моторного масла Лукойл 15W-40 (1) и моторного масла Лукойл 15W-40 с РЭД (2) от пробега автомобилей КАМАЗ 55-102

Следует отметить, что незначительный рост вязкости кинематической моторного масла в процессе эксплуатации ДВС является закономерностью, обусловленной накоплением в нем смол и продуктов окисления.

Как известно, щелочное число моторного масла характеризует в основном динамику срабатывания противоизносных и моюще-диспергирующих присадок. В связи с этим в дальнейшем проводили исследования влияния предлагаемой добавки, способствующей повышению противоизносных и антифрикционных свойств моторных масел, на изменение щелочного числа базового моторного масла в процессе эксплуатации экспериментальных двигателей КАМАЗ 7403.10. При испытании сравнивали с показателями двигателей КАМАЗ 7403.10, заправленных базовым маслом Лукойл 15W-40.

На рисунке 4.30 показана зависимость изменения щелочного числа моторного масла Лукойл 15W-40 с добавкой «Кластер-В» и без нее от наработки в двигателях КАМАЗ 7403.10.

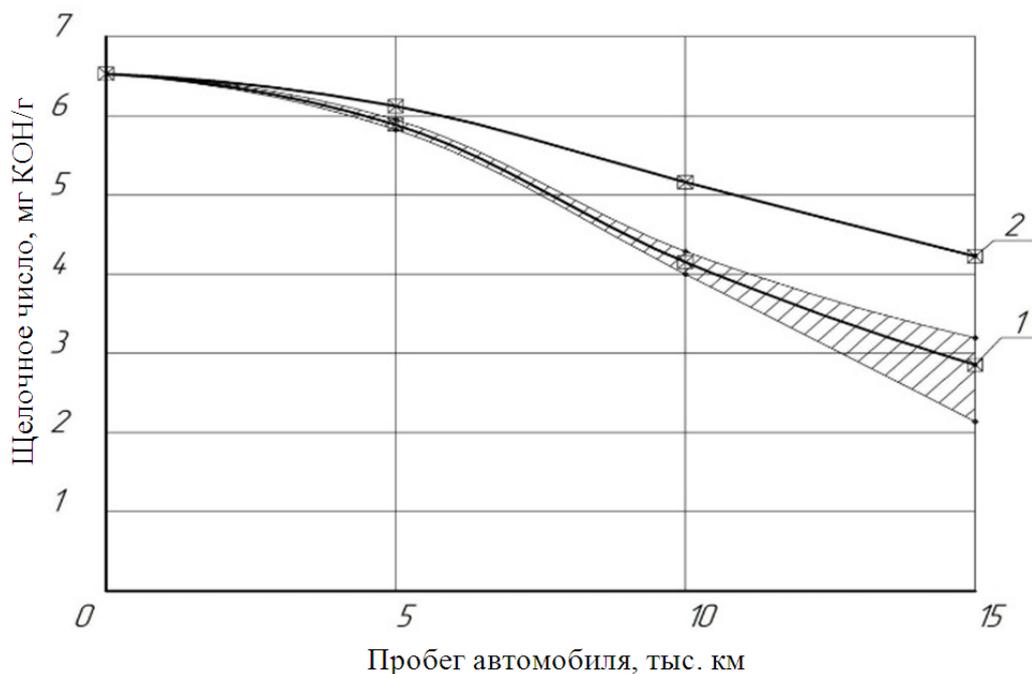


Рисунок 4.30 – Зависимость изменения щелочного числа базового моторного масла Лукойл 15W-40 (1) и моторного масла Лукойл 15W-40 с РЭД (2) от пробега автомобилей КАМАЗ 55-102;  – закономерности, полученные по результатам исследований института ФГБНУ ВНИИТиН

Анализ полученных зависимостей (см. рисунок 4.30) показал, что щелочное

число исследуемых моторных масел снижалось практически весь период наблюдений и к 15 тыс. км пробега автомобилей КАМАЗ 55-102 у базового масла Лукойл 15W-40 оно составило 2,8 мг КОН/г, а у смеси моторного масла Лукойл 15W-40 с добавкой «Кластер-В» – 4,2 мг КОН/г, или в 1,5 раза больше.

На основании результатов исследований сотрудников института ФГБНУ ВНИИТиН значение щелочного числа масла в зависимости от ряда известных факторов (нагрузка, техническое состояние автомобиля, качество используемого топлива) к моменту наработки 15 тыс. км пробега автомобиля чаще всего составляет 2–3 мг КОН/г, что свидетельствует о приближении масла по данному показателю к браковочному значению и необходимости его замены в ДВС. За счет действия разработанной РЭД «Кластер-В» в экспериментальных двигателях сохранялись высокие эксплуатационные характеристики, на что указывают значения щелочного числа предлагаемой смазочной композиции, которые свидетельствуют о значительной остаточной работоспособности моторного масла и увеличении его срока службы до замены.

Результаты анализа изменения кислотного числа исследуемых смазочных материалов в зависимости от пробега экспериментальных автомобилей КАМАЗ 55-102 представлены на рисунке 4.31.

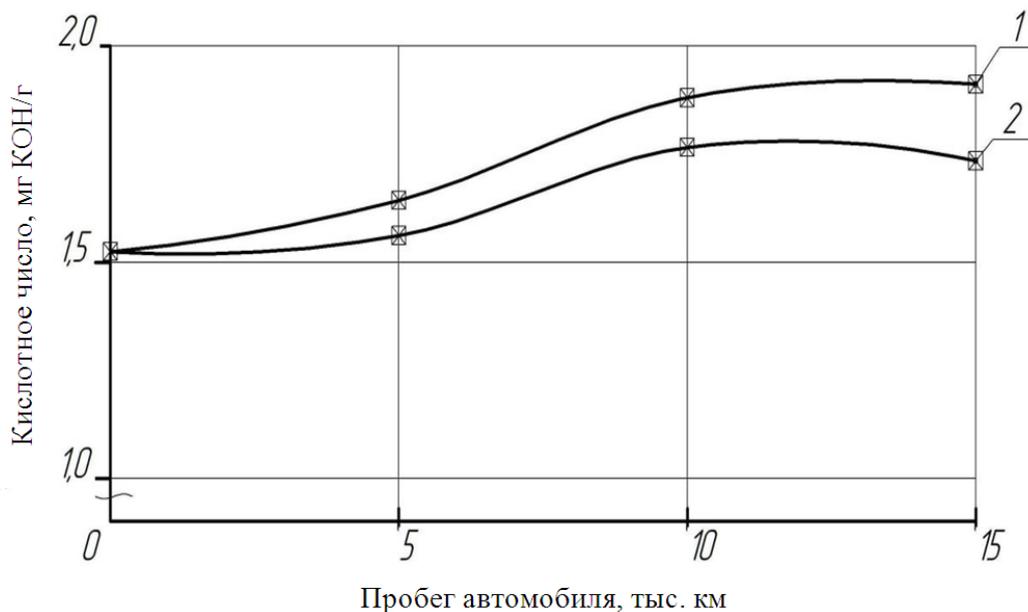


Рисунок 4.31 – Зависимость изменения кислотного числа базового моторного масла Лукойл 15W-40 (1) и моторного масла Лукойл 15W-40 с РЭД (2) от пробега автомобилей КАМАЗ 55-102

Как видно из рисунка 4.31, в двигателях, работавших на масле Лукойл 15W-40 с разработанной РЭД «Кластер-В», было накоплено продуктов окисления в 1,2 раза меньше по сравнению с двигателями, заправленными базовым маслом Лукойл 15W-40.

Величины изменения кислотного числа экспериментальных моторных масел показали незначительное накопление в них продуктов окисления. Данный факт свидетельствует о естественном прохождении процесса накопления в моторном масле продуктов сгорания топлива и окисления самого масла, а также о высоком качестве используемого базового моторного масла Лукойл 15W-40 и предлагаемой РЭД «Кластер-В».

Известно, что в процессе работы двигателя в моторном масле накапливаются механические примеси и продукты износа его деталей. Большая их часть, как правило, появляется после замены моторного масла с отработанного на свежее в первые 20...50 ч наработки. В большей степени это остаточные загрязнения, не удаленные из системы смазки при сливе отработанного моторного масла.

Результаты исследования влияния предлагаемой РЭД на процесс накопления механических примесей в моторном масле в зависимости от пробега экспериментальных автомобилей КАМАЗ 55-102 представлены на рисунке 4.32.

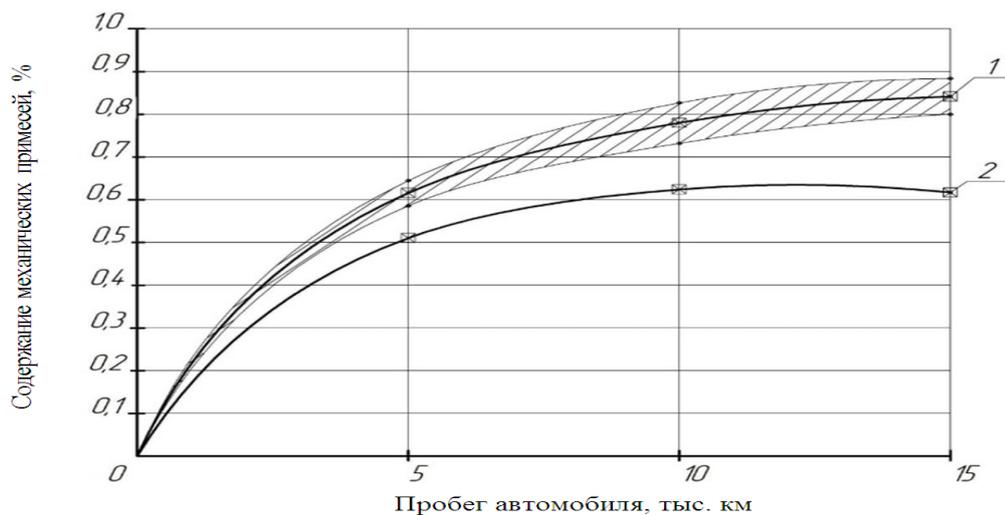


Рисунок 4.32 – Зависимость изменения содержания механических примесей в базовом моторном масле Лукойл 15W-40 (1) и моторном масле Лукойл 15W-40 с РЭД (2) от пробега автомобилей КАМАЗ 55-102;  – закономерности изменения содержания механических примесей в моторном масле в процессе эксплуатации автомобилей, полученные по результатам исследований института ФГБНУ ВНИИТиН

Через 15 тыс. км пробега экспериментальных автомобилей содержание механических примесей в моторных маслах двигателей, заправленных базовым маслом Лукойл 15W-40, составило 0,84 %, а в моторных маслах двигателей, работающих на предлагаемой смазочной композиции, – 0,61 %, что в 1,38 раза меньше. Это происходило за счет действия компонентов разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки, которые в результате механо-физико-химических процессов при контакте с поверхностями трения деталей образовывали пленку с высокими противоизносными, антифрикционными и противозадирными свойствами. Кроме того, компоненты предлагаемой РЭД заплавляли поверхностные дефекты и впадины шероховатостей трущихся деталей. Это приводило к увеличению фактической площади контакта трущихся деталей и снижало удельную нагрузку, приходящуюся на микровыступы. Ультра- и наноразмерные частицы добавки, не участвующие в формировании поверхностей пленки трущихся деталей, способствовали повышению предела прочности масляного слоя.

В целом по результатам лабораторных и эксплуатационных испытаний и оценки изменения физико-химических характеристик моторных масел под действием ремонтно-эксплуатационной добавки «Кластер-В» установлены преимущества предлагаемого трибопрепарата, позволяющего снизить износ деталей двигателя и продлить срок службы моторного масла.

Обработку экспериментальных данных исследований изменения физико-механических свойств предлагаемой смазочной композиции проводили методами математической статистики (приложение 10).

Результаты анализа изменений физико-химических показателей экспериментальных моторных масел в лабораторных условиях и после эксплуатационных испытаний автомобилей КАМАЗ 55-102, укомплектованных двигателями КАМАЗ 7403.10-260, показали, что разработанная ремонтно-эксплуатационная добавка не ухудшает качество базовых моторных масел и способствует увеличению срока их службы.

4.10 Выводы по главе

1. Разработан состав ремонтно-эксплуатационной добавки к моторному маслу на основе ультра- и наноразмерных порошкообразных компонентов. Методом математического планирования эксперимента определена их оптимальная концентрация. На разработанный состав смазочной композиции, названной «Кластер-В», получен патент Российской Федерации № 2525238.

2. Результаты исследования влияния разработанной РЭД 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 показателями базового масла Лукойл 15W-40. Кроме того, существенно улучшились противоизносные свойства разработанной смазочной композиции, а после 3 ч испытаний был выявлен ее восстановительный эффект. Масса трущихся деталей (колодки) после испытаний увеличилась в среднем на 2 мг.

3. При рассмотрении с помощью оптического микроскопа поверхности трения модельных образцов, испытанных на базовом масле Лукойл 15W-40 с РЭД, хорошо видны участки новообразований. Характерно, что они начинают формироваться в наиболее нагруженных местах поверхностей трения образцов, вызванных повышенной шероховатостью, или в зонах поверхностных дефектов. Кроме того, на поверхности трения образцов, испытанных на масле Лукойл 15W-40 с РЭД, наблюдаются последствия интенсивного пластического течения металла, приводящего к сокрытию поверхностных дефектов и образованию сглаженного микрорельефа. Этому явно способствуют элементы, входящие в состав добавки.

С помощью масс-спектрального анализа образцов трения было обнаружено, что наряду с основным химическим элементом железом, содержащимся в материале, из которого изготовлены образцы, выявлены также компоненты порошкообразных добавок, применяемых в смазочных материалах, что указывает на их участие в формировании рабочих поверхностей образцов трения.

Исследования, проведенные с помощью растрового электронного микроскопа, показали, что компоненты добавки спрессовываются и за счет адгезии запол-

няют 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 контактов давлений.

4. Результаты проведенных сравнительных стендовых испытаний экспериментальных двигателей на износ основных деталей КШМ наглядно показали эффективность применения разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки. Ее использование привело к снижению износа основных деталей КШМ двигателя КАМАЗ-7403.10 в 1,21–2,3 раза. Износ гильз цилиндров двигателей, работающих на масле Лукойл 15W-40 с разработанной добавкой, в среднем уменьшился в 1,36 раза по сравнению с двигателем, работающим 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, как у гильз цилиндров двигателей, работающих на базовом масле Лукойл 15W-40.

Средний износ первых компрессионных колец уменьшился в 1,28 раза, вторых – в 1,33 раза, а маслосъемных – в 1,56 раза по сравнению с износом колец двигателей, работающих на базовом масле Лукойл 15W-40.

Средняя величина износа коренных вкладышей двигателя, работавшего на моторном масле Лукойл 15W-40 с предлагаемой РЭД, была в 1,22 раза, а шатунных вкладышей – в 1,25 раза меньше, чем у двигателя, работавшего на базовом масле Лукойл 15W-40.

Средняя величина износа коренных шеек коленчатого вала двигателя, работавшего на моторном масле Лукойл 15W-40 с РЭД, в 1,14 раза, а шатунных шеек – в 2,3 раза меньше по сравнению с двигателем, работавшим на базовом масле Лукойл 15W-40.

Анализ показал, что применение разработанной РЭД к моторному маслу Лукойл 15W-40 привело к снижению величины износа кулачков в 1,21 раза, а опорных шеек распределительного вала – в 1,13 раза по сравнению с величинами износа аналогичных деталей двигателя, работавшего на базовом масле Лукойл 15W-40.

В результате сравнительных эксплуатационных испытаний установлено, что прогнозируемое увеличение остаточного ресурса двигателей, работающих на моторном масле Лукойл 15W-40 с добавкой «Кластер-В», в среднем составит 55844 км пробега, что в 1,82 раза больше по сравнению с двигателями, работающими на базовом моторном масле Лукойл 15W-40.

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.

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ ДОБАВКИ К МОТОРНОМУ МАСЛУ

Расчет экономической эффективности применения смазочной композиции, содержащей разработанную добавку «Кластер-В», проводили на основании данных эксплуатационных испытаний в условиях АО «Декабрист» (Ершовский р-н, Саратовская обл.).

Ресурс двигателя до капитального ремонта T (тыс. км) определяли по формуле:

$$T = \frac{T_{1,2}}{T_r},$$

где $T_{1,2}$ – средний ресурс до капитального ремонта двигателей, эксплуатируемых без добавки (индекс «1») и с разработанной добавкой «Кластер-В» (индекс «2»), км;
 T_r – средний годовой пробег контролируемых автомобилей в хозяйстве, км.

В ходе эксплуатационных испытаний были определены значения остаточного ресурса экспериментальных двигателей $T_{1ост}$ и $T_{2ост}$, а также средний годовой пробег контролируемых автомобилей в хозяйстве T_r :

$$T_{1ост} = 68104 \text{ км};$$

$$T_{2ост} = 123948 \text{ км};$$

$$T_r = 58000 \text{ км}.$$

Использование предлагаемого состава смазочной композиции позволило увеличить остаточный ресурс двигателей КАМАЗ-7403.10 в среднем на 82 % (согласно актам эксплуатационных испытаний, представленным в приложении 12).

Дополнительные затраты в процессе эксплуатации двигателей с разработанной смазочной композицией включают в себя только ее стоимость. Учитывая, что межремонтный ресурс двигателей КАМАЗ-740 (по паспортным данным) составляет 400 тыс. км, а моторное масло заменяют при ТО-2, т. е. через каждые 15–16 тыс. км, то РЭД следует применять 25 раз ($D = 25$).

Если потребитель приобретает добавку у предприятия-изготовителя или через торговую сеть, то учитывают только И – годовые текущие издержки при ис-

пользовании масла с РЭД ($Z_r = И$, где Z_r – затраты на использование добавки в период эксплуатации):

$$Z_r = \frac{\Delta M}{100} c_1 + \frac{\Delta П}{100} c_2,$$

где ΔM – содержание базового моторного масла Лукойл 15W-40 в композиции, %;

$\Delta П$ – концентрация РЭД в моторном масле, %;

c_1 – оптовая цена базового моторного масла Лукойл 15W-40, руб./т;

c_2 – стоимость добавки «Кластер-В», руб./т.

Сумма затрат Z_n на добавку за межремонтный период:

$$Z_n = Z_{г.дв.Д},$$

где $Z_{г.дв.Д}$ – затраты на использование добавки на 1 двигатель, $Z_{г.дв.Д} = 667,8$ руб./дв.

$$Z_n = 667,8 \cdot 25 = 16695 \text{ руб.}$$

Для определения экономического эффекта при усовершенствовании операций технического обслуживания двигателя КАМАЗ 7403.10 за счет применения добавки «Кластер-В» в АО «Декабрист» были получены следующие данные по автомобилям марки КАМАЗ-55102:

1. Средняя стоимость капитального ремонта двигателя КАМАЗ-7403.10 – 250 тыс. руб.

2. Затраты на РЭД за межремонтный период – 16695 руб.

Тогда удельные затраты на 1 км пробега автомобиля КАМАЗ 55102 до и после усовершенствования операций ТО-2 [75]:

$$Z_{уд1} = \frac{C_{кр}}{T_1},$$

где $Z_{уд1}$ – удельные затраты на 1 км пробега автомобилям КАМАЗ-55111 до усовершенствования ТО, руб./км;

$C_{кр}$ – стоимость капитального ремонта двигателя КАМАЗ-7403.10, руб.;

T_1 – межремонтный ресурс двигателя автомобиля КАМАЗ 55102 без использования добавки, км;

$$z_{уд2} = \frac{C_{кр} + z_{п}}{T_2},$$

где $z_{уд2}$ – удельные затраты на 1 км пробега автомобиля КАМАЗ 55102 после усовершенствования ТО, руб./км;

T_2 – межремонтный ресурс двигателя автомобиля КАМАЗ 55102 при использовании разработанной добавки, км.

$$z_{уд1} = \frac{250000}{293104} = 0,85 \text{ руб./км};$$

$$z_{уд2} = \frac{250000 + 16695}{350948} = 0,76 \text{ руб./км}.$$

Определив удельные затраты до и после применения добавки «Кластер-В», рассчитали удельный экономический эффект на 1 км пробега автомобиля КАМАЗ 55102, получаемый от применения добавки «Кластер-В», руб./км:

$$\mathcal{E}_{уд} = z_{уд1} - z_{уд2},$$

где $\mathcal{E}_{уд}$ – удельный экономический эффект на 1 км пробега автомобиля КАМАЗ 55102, получаемый от применения добавки «Кластер-В», руб./км.

$$\mathcal{E}_{уд} = 0,85 - 0,76 = 0,09 \text{ руб./км}.$$

Годовой экономический эффект $\mathcal{E}_{год}$, получаемый от увеличения межремонтного ресурса двигателя КАМАЗ-7403.10 при эксплуатации одного автомобиля марки КАМАЗ 55102:

$$\mathcal{E}_{год} = \mathcal{E}_{уд} T_{г};$$

$$\mathcal{E}_{год} = 0,09 \cdot 58000 = 5220 \text{ руб./дв}.$$

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 от внедрения разработанной добавки к моторному маслу «Кластер-В» 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 возможно путем повышения эффективности проведения операций технического сервиса с применением современных экспресс-технологий, способствующих снижению скорости 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 (2.80), 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 (2.82).

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», получен патент на изобретение 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 противоизносные 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 при-

вело 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 повышения межремонтного ресурса двигателей предприятиям, занимающимся эксплуатацией и техническим сервисом автотракторной техники, рекомендуется применять разработанную ремонтно-эксплуатационную 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

КШМ – кривошипно-шатунный механизм

ДВС – двигатель внутреннего сгорания

ЦПГ – цилиндропоршневая группа

АПК – агропромышленный комплекс

ПАВ – поверхностно-активное вещество

УНПМ – ультра- и наноразмерные порошкообразные материалы

НРП – наноразмерный порошок

ПТК – полититанат калия

УРП – ультраразмерный порошок

ТС – технический сервис

ТО – техническое обслуживание

УДП – ультрадисперсный порошок

УЗ – ультразвук

РЭД – ремонтно-эксплуатационная добавка

НРПМ – наноразмерный порошок меди

НРПС – наноразмерный порошок сплава Cu-Sb

НРПЛЛ – наноразмерный порошок легированного сплава Cu-Zn-S-P

УДПТК – ультрадисперсный порошок полититаната калия

УНРПЛП – смесь наноразмерного порошка легированного сплава Cu-Zn-S-P и ультрадисперсного порошка полититаната калия

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамзон, А. А.* Поверхностно-активные вещества. Синтез, анализ, свойства, применение : учебник для вузов / А. А. Абрамзон, Л. П. Зайченко, С. И. Файнгольд ; под ред. А. А. Абрамзона. – Л. : Химия, 1988. – 200 с.
2. *Автомобильные масла, смазки, присадок* : справочное пособие / И. И. Гнатченко [и др.] ; под общ. ред. С. А. Золотарёва. – М. : АСТ ; СПб. : Полигон, 2000. – 360 с.
3. *Агранат, Б. А.* Основы физики и техники ультразвука / Б. А. Агранат. – М. : Медиа, 1997. – 257 с.
4. *Азаров, А. С.* Повышение долговечности подшипников качения ступиц колес автотракторной техники путем модификации смазочной среды : дис. ... канд. техн. наук / Азаров Александр Сергеевич. – Саратов, 2008. – 186 с.
5. *Александров, В. А.* Повышение долговечности автотракторных дизелей применением присадки к моторному маслу на основе наночастиц цветных металлов : дис. ... канд. техн. наук / Александров Владислав Александрович. – Саратов, 2005. – 232 с.
6. *Александровская, Л. Н.* Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем / Л. Н. Александровская, А. П. Афанасьев, А. А. Лисов. – М. : Логос, 2001. – 208 с.
7. *Алиев, А. М.* Совершенствование метода и разработка средств диагностирования плунжерных пар при техническом сервисе топливной аппаратуры дизелей : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Алиев Арсен Магомедович. – М., 2011. – 167 с.
8. *Андреев, Ю. В.* Быстроходные дизели производства зарубежных стран : учебное пособие / Ю. В. Андреев, А. Е. Свистула. – Барнаул : Алтайский гос. техн. ун-т им. Ползунова, 2002. – 169 с.
9. *Арабян, С. Г.* Масла и присадки для тракторных и комбайновых двигателей : справочник / С. Г. Арабян, А. Б. Виппер, И. А. Холомонов. – М. : Машиностроение, 1994. – 208 с.
10. *Аринин, И. Н.* Техническая эксплуатация автомобилей : учебное пособие / И. Н. Аринин, С. И. Коновалов, Ю. В. Баженов. – 2-е изд. – Ростов н/Д, 2007. – 314 с.

11. *Архангельский, В. М.* Автомобильные двигатели / В. М. Архангельский. – М. : Машиностроение, 1973. – 342 с.
12. А. с. 827538 СССР, МКИ С 10 М 5/02. Антифрикционная металлоплакирующая присадка / Г. В. Старикова, Д. М. Белый, В. Н. Стариков (СССР). – № 2673722 ; заявл. 14.08.78 ; опубл. 30.07.81, Бюл. № 18. – 3 с.
13. А. с. 727676 СССР, МКИ С 10 М 7/12. Антифрикционная смазка / Н. М. Мамаев, С. М. Губарев, Г. Н. Гаврилова и др. (СССР). – № 2636744/23-04 ; заявл. 28.06.78 ; опубл. 02.08.80, Бюл. № 14. – 3 с.
14. А. с. 1813781 СССР, МКИ С 10 М 125/02. Противоизносная присадка «Валерин» к смазочным маслам / В. Ю. Гусак (СССР). – № 4770128/04 ; заявл. 19.12.89 ; опубл. 12.05.93, Бюл. № 17. – 6 с.
15. А. с. 1669976 СССР, МКИ С 10 М 125/20. Смазочная композиция / Н. В. Алексеев, В. А. Бурлаков, М. Б. Генералов, М. А. Горовой, В. Н. Монахов, А. В. Самохин, Г. А. Тетерин, В. Н. Троицкий, Е. В. Троицкая (СССР). – № 4393134/04 ; заявл. 18.03.88 ; опубл. 15.08.91, Бюл. № 30. – 8 с.
16. *Бакли, Д.* Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Д. Бакли. – М. : Машиностроение, 1996. – 360 с.
17. *Балабанов, В. И.* Безразборное восстановление трущихся соединений автомобиля. Методы и средства / В. И. Балабанов. – М. : Астрель АСТ, 2003. – 280 с.
18. *Балабанов, В. И.* Нанотехнологии. Наука будущего / В. И. Балабанов. – М. : Эксмо, 2009. – 256 с.
19. *Балабышко, А. М.* Гидромеханическое диспергирование / А. М. Балабышко, А. И. Зимин, В. П. Ружицкий. – М. : Наука, 1998. – 330 с.
20. *Баширов, Р. М.* Топливные системы автотракторных и комбайновых дизелей, конструкционные особенности и показатели работы / Р. М. Баширов. – Уфа : БГАУ, 2000. – 156 с.
21. Безызносная эксплуатация двигателей внутреннего сгорания : [монография] / Р. Ю. Соловьев [и др.] ; под общ. ред. Р. Ю. Соловьева. – М. : ФГБНУ ГОСНИТИ, 2015. – 196 с.
22. *Берковский, Б. М.* Магнитные жидкости / Б. М. Берковский. – М. : Химия, 1999. – 238 с.

23. *Борщенко, Я. А.* Разработка метода диагностирования автомобильных дизелей по неравномерности вращения коленчатого вала : дис. ... канд. техн. наук / Борщенко Ярослав Анатольевич. – Тюмень, 2003. – 175 с.

24. *Браун, Э. Д.* Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1982. – 191 с.

25. Влияние герметичности впускного тракта на ресурс двигателя / В. Н. Барук [и др.] / Конструкции автомобилей : экспресс информация // НИИ автопром. – М., 1991. – Вып. 8. – С. 5–13.

26. Влияние различных поверхностно-активных веществ на фракционный состав порошков полититаната калия и их трибологические свойства // А. В. Гороховский [и др.] // Нанотехника. – 2009. – № 4. – С. 96–99.

27. Влияние ультразвука на седиментационную устойчивость нанодисперсного порошка в смазочной среде // В. В. Сафонов [и др.] // Наука в центральной России. – 2019. – № 6 (42). – С. 67–75.

28. *Воротягин, М. И.* Применение нанотехнологий при восстановлении трущихся поверхностей деталей / М. И. Воротягин // Техника в сельском хозяйстве. – 2010. – № 4. – С. 3–4.

29. Восстановление деталей силового агрегата КАМАЗ 740.11-240 (Евро-1) / Р. А. Азаматов [и др.] ; под ред. А.С. Денисова. – Набережные Челны, 2007. – 307 с.

30. *Гаркунов, Д. Н.* Триботехника (износ и безызносность) / Д. Н. Гаркунов. – М. : МСХА, 2001. – 616 с.

31. *Гаркунов, Д. Н.* Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин) : учебник / Д. Н. Гаркунов ; Моск. с.-х. акад. – 5-е изд., перераб. и доп. – М., 2002. – 632 с.

32. *Гаркунов, Д. Н.* Триботехника. Краткий курс / Д. Н. Гаркунов, Э. Л. Мельников, В. С. Гаврилюк – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 308 с.

33. *Гаркунов, Д. Н.* Триботехника : пособие для конструктора / Д. Н. Гаркунов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1999. – 336 с.

34. *Горячева, И. Г.* Контактные задачи в трибологии / И. Г. Горячева, М. Н. Добычин. – М. : Машиностроение, 1998. – 256 с.

35. ГОСТ 14846-81. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 42 с.
36. ГОСТ 18136-72. Масла. Метод определения стабильности против окисления в универсальном аппарате. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 7 с.
37. ГОСТ 17479.1-2015. Масла моторные. Классификация и обозначение. – М. : Стандарт, 2017. – 10 с.
38. ГОСТ 33-82. Нефтепродукты. Метод определения кинематической и расчет динамической вязкости. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 22 с.
39. ГОСТ 11362-96. Нефтепродукты. Метод определения числа нейтрализации потенциометрическим титрованием. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 17 с.
40. ГОСТ 6370-83. Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей. – М. : Изд-во стандартов, 2008. – 7 с.
41. ГОСТ 27.302-86. Надежность в технике. Методы определения допускаемого отклонения параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов машин. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 23 с.
42. *Григорьев, М. А.* Обеспечение надежности двигателей / М. А. Григорьев, В. А. Долецкий. – М., 1997. – 324 с.
43. *Григорьев, М. А.* Соотношение износов, вызванных различными эксплуатационными факторами, в общем износе цилиндров двигателя / М. А. Григорьев, В. М. Павлинский, Б. Н. Бунаков // Автомобильная промышленность. – 1985. – № 3. – С. 3–6.
44. Двигатели внутреннего сгорания / А. С. Хачиян [и др.]. – М. : Высш. шк., 1985. – 348 с.
45. Двигатели внутреннего сгорания : в 3 кн. / В. Н. Луканин [и др.] ; под ред. В. Н. Луканина, М. Г. Шатрова. – 3-е изд., перераб. и испр. – М. : Высш. шк., 2007. – Кн. 1. Теория рабочих процессов. – 479 с.
46. Двигатели внутреннего сгорания : в 3 кн. / В. Н. Луканин [и др.] ; под ред. В. Н. Луканина, М. Г. Шатрова. – 3-е изд., перераб. и испр. – М. : Высш. шк., 2007. – Кн. 2. Динамика и конструирование. – 400 с.

47. Двигатели внутреннего сгорания : в 3 кн. / В. Н. Луканин [и др.] ; под ред. В. Н. Луканина, М. Г. Шатрова. – 3-е изд., перераб. и испр. – М. : Высш. шк., 2007. – Кн. 3. Компьютерный практикум. Моделирование процессов в ДВС. – 416 с.

48. Двигатели внутреннего сгорания. Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – М. : Машиностроение, 1984. – 384 с.

49. Двигатели внутреннего сгорания / под ред. д-ра техн. наук проф. В. Н. Луканина. – М. : Высш. школа, 1985. – 265 с.

50. Двигатели внутреннего сгорания : теория поршневых и комбинированных двигателей / Д. Н. Вырубков [и др.]. – М. : Машиностроение, 1983. – 248 с.

51. Демкин, Н. Б. Качество поверхности и контакта деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – М. : Машиностроение, 1981. – 244 с.

52. Дунаев, А. В. Системное применение триботехнологий на всех этапах жизненного цикла машин и оборудования / А. В. Дунаев // Труды ГОСНИТИ. – М., 2014. – С. 88–91.

53. Елисеев, А. А. Функциональные наноматериалы / А. А. Елисеев, А. В. Лукашин ; под ред. Ю. Д. Третьякова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 456 с.

54. Ждановский, Н. С. Надежность и долговечность автотракторных двигателей / Н. С. Ждановский, А. В. Николаенко. – Л. : Колос, 1981. – 295 с.

55. Зарубежные масла, смазки, присадки, технические жидкости / В. Д. Резников [и др.]. – М. : Техинформ, 2005. – 280 с.

56. Заявка 2005138479 Российская Федерация, МПК F 01 M 5/00. Способ продления срока службы деталей трения в процессе работы механизмов / Малофеев С. Г. ; заявитель Малофеев С. Г. – № 2005138479 ; заявл. 01.12.2005 ; опубл. 2007.06.10. – 1 с.

57. Ивахник, А. В. Пластичные смазочные материалы на основе бинарной дисперсной фазы повышенной нагрузочной способности : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.09 / Ивахник Антон Владимирович. – Минск, 2014. – 190 с.

58. Иващенко, Н. А. Прогнозирование температурных полей деталей поршневых двигателей : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Иващенко Николай Антонович. – М., 1994. – 32 с.

59. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения / Д. Н. Гаркунов [и др.] ; под ред. Д. Н. Гаркунова. – М. : Машиностроение, 1982. – 207 с.

60. Инновационные методы повышения послеремонтной надежности сельскохозяйственной техники и инвестиционной привлекательности ремонтно-обслуживающих предприятий в АПК : [монография] / В. И. Черноиванов [и др.] ; под общ. ред. В. И. Черноиванова. – М. : ГНУ ГОСНИТИ, 2012. – 400 с.

61. Исследования трибосоставов на основе гексагонального нитрида бора / Д. А. Гительман [и др.] // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 115. – С. 66–70.

62. *Кламманн, Д.* Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты / Д. Кламанн. – М. : Химия, 1988. – 488 с.

63. *Комбалов, В. С.* Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ / В. С. Комбалов. – М. : Наука, 1984. – 112 с.

64. *Крагельский, И. В.* Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 576 с.

65. *Крагельский, И. В.* Трение, изнашивание и смазка / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1978. – 400 с.

66. *Крагельский, И. В.* Узлы трения машин / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.

67. *Крагельский, И. В.* Фрикционные автоколебания / И. В. Крагельский, Н. В. Гитис. – М. : Наука, 1987. – 151 с.

68. *Кулиев, А. М.* Химия и технология присадок к маслам и топливам. – 2-е изд., перераб. – Л. : Химия, 1995. – 312 с.

69. *Лаптев, А. А.* Анализ причин капитального ремонта двигателей / А. А. Лаптев, А. П. Самоцветов, П. С. Фридрих // Техника в сельском хозяйстве. – 1993. – № 10. – С. 49–50.

70. *Левин, М. И.* Современное состояние. Проблемы дизельной автоматики в зарубежной практике и отечественный опыт / М. И. Левин // Двигателестроение. – 1999. – № 4. – С. 28–32.

71. *Лялякин, В. П.* К вопросу снижения скорости возрастания зазоров в ресурсных сопряжениях деталей в узлах и механизмах тракторов / В. П. Лялякин, А. К. Ольховацкий // Труды ГОСНИТИ. – 2009. – Т. 103. – С. 111–116.

72. *Малаховецкий, А. Ф.* Повышение надежности турбокомпрессоров авто-тракторных двигателей путем снижения их теплонапряженности : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Малаховецкий Андрей Федорович. – Саратов, 2005. – 141 с.

73. *Манукян, Н. В.* Спечённые антифрикционные материалы для тяжело-нагруженных узлов трения / Н. В. Манукян, А. К. Погосян, З. А. Манвенян // Порошковая металлургия. – 1998. – № 12. – С. 56–60.

74. *Мещеряков, В. В.* Задачи по статистике и регрессионному анализу с MATLAB / В. В. Мещеряков. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2009. – 448 с.

75. *Михин, Н. М.* Механизм приработки при исходном пластическом контакте / Н. М. Михин // Трение и износ. – 1985. – Т. 6. – № 5. – С. 807–811.

76. Многофункциональная добавка к моторным маслам / В. В. Сафонов [и др.] // Двигателестроение. – 2014. – № 2 (256). – С. 32–35.

77. Наноматериалы в техническом сервисе сельскохозяйственных машин : учебное пособие для вузов / В. И. Черноиванов [и др.] ; под общ. ред. В. И. Черноиванова. – М. : ГНУ ГОСНИТИ, 2010. – 68 с.

78. *Немков, М. В.* Корректирование нормативов ресурса двигателей специальных автомобилей в зависимости от режимов эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук / Немков Михаил Васильевич. – Тюмень, 2005. – 136 с.

79. Нестационарный локальный теплообмен в быстроходном дизеле при поршневом сжатии-расширении / Б. А. Максимов [и др.] // Двигателестроение. – 1991. – № 5. – С. 10–11.

80. *Никитин, Д. А.* Повышение ресурса дизелей совершенствованием узлов уплотнения при изготовлении и ремонте : дис. ... д-ра техн. наук / Никитин Дмитрий Анатольевич. – Саратов, 2013. – 263 с.

81. *Новиков, В. Г.* Повышение долговечности цилиндро-поршневой группы автомобильного дизеля : дис. ... канд. техн. наук / Новиков Владимир Георгиевич. – М., 1997. – 306 с.

82. *Носихин, П. И.* Автоматическое устройство для непрерывной регистрации суммарного износа испытуемых образцов / П. И. Носихин, С. В. Стребков // Способы повышения долговечности тракторов и сельхозмашин : науч. тр. МИИСП. – М., 1988. – С. 120–122.

83. О влиянии нано- и высокодисперсных порошкообразных добавок на эксплуатационные свойства моторного масла / В. В. Сафонов [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 12. – С. 100–105.

84. Оптимизация нанодисперсной добавки в моторное масло / Э. К. Добринский [и др.] // Вестник АПК Ставрополя. – 2014. – № 3 (15). – С. 12–16.

85. *Остриков, В. В.* Повышение эффективности действия ремонтно-восстановительных составов / В. В. Остриков, А. Г. Зимин, С. Ю. Попов // Наука в центральной России. – 2013. – № 5. – С. 30–36.

86. Пат. 2412980 Российская Федерация, МПК С10 М 103/06, С10 М 125/10, С10 М 129/40, С10 N 30/06. Антифрикционная суспензия / Гороховский А. В., Палагин А. И., Сафонов В. В., Азаров А. С. ; заявитель ООО «Нанокompозит». – № 2009137937 ; заявл. 14.10.2009 ; опубл. 27.02.2011, Бюл. № 6. – 6 с.

87. Пат. 145469 ГДР. МКИ С 10 М 3/48. Смазка пар трения. – № 175881 ; заявл. 29.12.93 ; опубл. 17.12.2003. – 5 с.

88. Пат. 2517175 Российская Федерация, МПК С10 М 141/02, С10 М 125/10, С10 N 20/06, С10 N 30/06, С10 N 30/08. Высокотемпературная смазочная композиция / Харин П. А., Харламова Т. Л., Востриков В. С. ; заявитель ОАО «Научно-исследовательский и конструкторский институт химического машиностроения» (ОАО «НИИхиммаш»). – № 2012156038 ; заявл. 25.12.2012 ; опубл. 27.05.2014, Бюл. № 15. – 5 с.

89. Пат. 2415176 Российская Федерация, МПК С10 М 103/06, С10 М 125/26. Нанотехнологическая антифрикционная порошковая композиция (варианты), нанотехнологическая смазочная композиция и способ нанотехнологической смазки / Давыдов Н. А., Зуев В. В., Рейбанд Ю. Я. ; заявители Давыдов Н. А., Зуев В. В., Рейбанд Ю. Я. – № 2009121480 ; заявл. 29.05.2009 ; опубл. 27.03.2011, Бюл. № 9. – 12 с.

90. Пат. 2493104 Российская Федерация, МПК С01 G 23/00, С01 D 13/00, С04 В 35/462, С10 М 125/10. Порошок титаната калия и смазочная композиция на его основе / Гороховский А. В., Палагин А. И., Сафонов В. В., Азаров А. С., Третьяченко Е. В., Сафонов К. В. ; патентообладатели Гороховский А. В., Азаров А. С. – № 2012103825/05 ; заявл. 03.02.2012 ; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 22.

91. Пат. 2089598 Российская Федерация, МКИ С 10 М 125/04. Приработочное масло для двигателя внутреннего сгорания / Сафонов В. В., Добринский Э. К. ; патентообладатель Сафонов В. В. – № 93057128/04 ; заявл. 22.12.93 ; опубл. 10.09.97, Бюл. № 25. – 12 с.

92. Пат. 2619933 Российская Федерация, МПК С10 М 125/04, С10 М 125/02, С10 N 30/06. Ремонтно-восстановительная добавка к жидким и пластичным смазочным материалам / Черногиль В. Б. ; заявитель Черногиль В. Б. – № 2016125431 ; заявл. 24.06.2016 ; опубл. 22.05.2017, Бюл. № 15. – 7 с.

93. Пат. 2598078 Российская Федерация, МПК С10 М 107/20, С10 М 125/02, С10 М 125/22, С10 М 125/30, С10 N 30/06. Ремонтно-восстановительная присадка к смазочным материалам / Черногиль В. Б. ; заявитель Черногиль В. Б. – № 2015133723 ; заявл. 11.08.2015 ; опубл. 20.09.2016, Бюл. № 26. – 6 с.

94. Пат. 2202600 Российская Федерация, МПК С10 М 137/10, С10 М 137/10, С10 М 125/04, С10 М 133/16, С10 N 30/06. Смазочная композиция / Дудко П. П., Кузьмин В. Н. ; заявитель ООО «ВМПАВТО» ; патентообладатели Дудко П. П., Кузьмин В. Н. – № 2001118758 ; заявл. 02.07.2001 ; опубл. 20.04.2003, Бюл. № 11. – 7 с.

95. Пат. 2340658 Российская Федерация, МПК С10 М 161/00, С10 М 125/10, С10 М 125/26, С10 М 145/22. Смазочная композиция и смазочный материал, ее содержащий (варианты) / Абрамян А. А., Беклемышев В. И., Махонин И. И., Варганов Р. В, Солодовников В. А. ; заявитель ЗАО «Институт прикладной нанотехнологии». – № 2007135847 ; заявл. 28.09.2007 ; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34. – 11 с.

96. Пат. 2417252 Российская Федерация, МПК С10 М 125/02, С10 М 177/00. Смазочная композиция и способ ее получения / Беляев В. Н., Ларионова И. С., Кутакова Н. М., Полева Л. И. ; заявитель ОАО «Федеральный научно-производственный центр "Алтай"». – № 2009131302 ; заявл. 17.08.2009 ; опубл. 27.04.2011, Бюл. № 12. – 10 с.

97. Пат. 2378326 Российская Федерация, МПК С10 М 101/02, С10 М 125/02, С10 М 125/26, С10 М 177/00. Смазочная композиция и способ ее получения / Туманян И. Б., Лукашев Е. А., Сеницын С. А., Туманян Б. П. ; заявитель ООО «ТУМА ГРУПП». – № 2008139524 ; заявл. 07.10.2008 ; опубл. 10.01.2010, Бюл. № 1. – 5 с.

98. Пат. 2596820 Российская Федерация, МПК С10 М 141/00, С10 М 125/02, С10 М 125/22, С10 М 107/04, С10 М 107/20, С10 М 107/46, С10 N 20/06, С10 N 30/06, С10 N 50/08. Смазочная композиция / Краснов А. П., Афоничева О. В., Буяев Д. И., Митин В. Г., Наумкин А. В., Соловьева В. А., Юдин А. С., Горошков М. В.; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова Российской академии наук (ИНЭОС РАН). – № 2015115056 ; заявл. 22.04.2015 ; опубл. 10.09.2016, Бюл. № 25. – 8 с.

99. Пат. 2311448 Российская Федерация, МПК С10 М 141/10, С10 М 125/02, С10 М 125/04, С10 М 137/10, С10 М 117/00. Смазочная композиция / Кузьмин В. Н., Погодаев Л. И. ; заявитель ООО «ВМПАВТО». – № 2006108425 ; заявл. 17.03.2006 ; опубл. 27.11.2007, Бюл. № 33. – 10 с.

100. Пат. 2507243 Российская Федерация, МПК С10 М 125/00, С10 М 125/04, С10 М 125/22, С10 М 125/24, С10 М 171/06, С10 N 30/06. Смазочная композиция / Остриков В. В., Сафонов В. В., Попов С. Ю., Сафонов К. В., Зимин А. Г. ; заявитель Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии). – № 2013101358 ; заявл. 10.01.2013 ; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5. – 4 с.

101. Пат. 2019563 Российская Федерация, МКИ С 10 М 125/02. Смазочная композиция «Ресурс-дизель» / Войтович Я. Н., Брегман М. М., Виппер А. Б., Добринский Э. К., Караулов А. К., Качалкова М. И., Романов В. С. ; патентообладатель Научно-производственная фирма «ВИРА». – № 50334800/04 ; заявл. 31.03.92 ; опубл. 15.09.94, Бюл. № 17. – 12 с.

102. Пат. 2123030 Российская Федерация, МПК⁶ С10 М 125/00, С10 М 125/04, С10 М 125/22, С10 М 125/24, С10 N 30/06. Смазочная композиция / Сафонов В. В., Добринский Э. К., Буйлов В. Н., Семин А. Г., Митюшкин А. А., Венскайтис В. В. ; патентообладатели Сафонов В. В., Добринский Э. К., Буйлов В. Н., Семин А. Г., Митюшкин А. А., Венскайтис В. В. – № 97116529/04 ; заявл. 07.10.1997 ; опубл. 10.12.1998, Бюл. № 34. – 5 с.

103. Пат. 2303051 Российская Федерация, МПК С10 М 125/02, С10 М 125/10, С10 М 125/22. Смазочная композиция / Щелканов С. И., Селютин Г. Е., Мариношкин Д. А., Терентьев В. Ф., Щелканов А. С. ; заявитель ГОУ ВПО Красноярский государственный технический университет (КГТУ). – № 2006107346 ; заявл. 09.03.2006 ; опубл. 20.07.2007, Бюл. № 20. – 3 с.

104. Пат. 2162878 Российская Федерация, МПК С10 М 125/02, С10 N 30/06. Смазочный материал / Кобылин В. П., Черский И. Н., Платонов Н. Н., Седалищев В. А. ; заявитель Институт физико-технических проблем Севера СО РАН. – № 98119059 ; заявл. 19.10.1998 ; опубл. 10.02.2001, Бюл. № 4. – 3 с.

105. Пат. 1730842 Российская Федерация, МПК С10 М 125/04. Смазочный состав / Ильин А. П., Краснятов Ю. А., Елизаров А. В., Чернов М.Г. ; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт высоких напряжений при Томском политехническом университете. – № 4791575/04 ; заявл. 14.02.90 ; опубл. 30.11.94, Бюл. № 22.

106. Пат. 2243252 Российская Федерация, МПК С10 М 125/00, С10 М 125/00, С10 М 125/10, С10 М 125/26, С10 N 30/06. Состав для повышения противоизносных и антифрикционных свойств узлов трения / Хазов С. П., Дураджи В. Н. ; заявитель ООО НТЦ «КОНВЕРС-РЕСУРС». – № 2003109642 ; заявл. 07.04.2003 ; опубл. 27.12.2004, Бюл. № 36. – 6 с.

107. Пат. 2591918 Российская Федерация, МПК С10 М 177/00, В82 В 1/00, В22 F 9/04, С10 М 125/04. Способ диспергирования наноразмерного порошка меди в базовом моторном масле / Хитерхеева Н. С., Номоев А. В., Бардаханов С. П., Батороев С. Б. ; заявитель ФГБОУ ВПО «Бурятский государственный университет». – № 2014149375 ; заявл. 08.12.2014 ; опубл. 20.07.2016, Бюл. № 20. – 4 с.

108. Пат. 2556111 Российская Федерация, МПК С09 С 1/36, С09 С 3/10, С10 М 113/16, С09 D 127/18. Способ получения антифрикционного материала / Гороховский А. В., Третьяченко Е. В., Гоффман В. Г., Юрков Г. Ю., Бузник В. М., Кирюхин Д. П. ; заявитель ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.» (СГТУ имени Гагарина Ю. А.). – № 2014100295 ; заявл. 09.01.2014 ; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 19. – 6 с.

109. Пат. 2326129 Российская Федерация, МПК C08 F 114/26, C08 F 14/26, C08 F 2/06, C08 F 4/34, C07 C 409/16, C08 F 2/00. Способ получения мелкодисперсного политетрафторэтилена / Бессолицына В. И., Воривошкин А. А., Дедов С. А., Жилин В. Г., Капустин И. М., Перминов В. В., Пурецкая Е. Р., Тишина В. В., Шабалин Д. А. ; заявитель ООО «Завод полимеров Кирово-Чепецкого химического комбината» (ООО «Завод полимеров КЧХК»). – № 2006131403 ; заявл. 31.08.2006 ; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 16. – 6 с.

110. Пат. 2501815 Российская Федерация, МПК C08 F 114/26, C08 J 11/10, B82 В 3/00, C08 J 3/28, C08 J 11/04. Способ получения нанодисперсного фторопласта / Курявый В. Г., Бузник В. М. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИХ ДВО РАН). – № 2012136686 ; заявл. 27.08.2012 ; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35. – 8 с.

111. Пат. 2382069 Российская Федерация, МПК C10 М 125/04, C25 С 7/00, B82 В 3/00. Способ получения нанокластеров металлов и устройство для его осуществления / Косогова Ю. П., Кужаров А. С., Кужаров А. А. ; заявитель ГОУ ВПО «Донской государственный технический университет». – № 2008132581 ; заявл. 06.08.2008 ; опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5. – 13 с.

112. Пат. 2207933 Российская Федерация, МПК⁷ В 22 F9/12. Способ получения ультрадисперсного порошка и устройство для его осуществления / Кириллин А. В., Добринский Э. К., Красюков Е. А., Малашин С. И. ; заявитель и патентообладатель Кириллин А. В. – № 2001118997/02 ; заявл. 10.07.2001 ; опубл. 10.07.2003. – 6 с.

113. Пат. 2161180 Российская Федерация, МПК C10 М 155/02, C10 М 155/02, C10 М 125/04, C10 N 10/02, C10 N 10/16. Способ приготовления присадки к смазочным маслам / Добринский Э. К., Малашин С. И. ; заявитель Кириллин В. И. – № 2000118435 ; заявл. 13.07.2000 ; опубл. 27.12.2000, Бюл. № 36. – 5 с.

114. Перспективные рецептуры моторных масел с нанодисперсными добавками для двигателей внутреннего сгорания / К. В. Сафонов [и др.] // Химия и технология топлив и масел. – 2022. – № 1 (629). – С. 16–18.

115. *Петров, И. А.* Автомобильные масла, смазки, присадки / И. А. Петров. – М. : Машиностроение, 2001. – 250 с.

116. Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества : справочник / под ред. А. А. Абрамзона. – Л. : Химия, 1984. – 391 с.

117. *Погодаев, Л. И.* Повышение надёжности трибосопряжений / Л. И. Погодаев, В. Н. Кузьмин, П. П. Дудко. – СПб. : Академия транспорта Российской Федерации, 2001. – 304 с.

118. Применение наноразмерных материалов при эксплуатации двигателей внутреннего сгорания : [монография] / В. В. Сафонов [и др.]. – Саратов, 2006. – 100 с.

119. *Протасов, К. В.* Статистический анализ экспериментальных данных / К. В. Протасов. – М. : Мир, 2005. – 142 с.

120. Работа дизелей в условиях эксплуатации : справочник / под ред. А. К. Костина. – Л. : Машиностроение, 1989. – 284 с.

121. Разработка ремонтно-восстановительного трибосостава для моторного масла / В. В. Сафонов [и др.] // Проблемы экономичности и эксплуатации авто-тракторной техники : матер. Междунар. науч.-техн. семинара им. В. В. Михайлова. – Саратов, 2014. – С. 165–168.

122. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар / А. В. Чичинадзе [и др.]. – М. : Наука, 1979. – 268 с.

123. Расширение функциональных возможностей добавок к моторным маслам / В. В. Остриков [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. – 2012. – № 2. – С. 32–33.

124. *Ребиндер, П. А.* Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия / П. А. Ребиндер. – М. : Наука, 1978. – 368 с.

125. *Родин, Ю. А.* Безызносность деталей машин при трении / Ю. А. Родин, П. Г. Суслов. – Л. : Машиностроение, 1989. – 229 с.

126. *Сафонов, В. В.* Исследование влияние добавок на трибологические характеристики смазочного материала и морфологию поверхностей трения / В. В. Сафонов [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 1. – С. 88–92.

127. *Сафонов, В. В.* Исследование присадки к моторному маслу на основе наночастиц меди / В. В. Сафонов, В. А. Александров // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники в АПК : межгосуд. науч.-техн. семинар. – Саратов : ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2011. – Вып. 24. – С. 48–50.

128. Сафонов, В. В. Металлсодержащие смазочные композиции в мобильной сельскохозяйственной технике : технология, исследование, применение / В. В. Сафонов [и др.]. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1999. – 80 с.

129. Сафонов, В. В. Повышение долговечности ресурсопределяющих агрегатов мобильной сельскохозяйственной техники путем применения металлсодержащих смазочных композиций : дис. ... д-ра техн. наук / Сафонов Валентин Владимирович. – Саратов, 1999. – 467 с.

130. Сафонов, В. В. Повышение эффективности эксплуатации сельскохозяйственной техники за счет применения наноматериалов / В. В. Сафонов, В. А. Александров, С. А. Шишурин // Нанотехника. – 2009. – № 20. – С. 79–80.

131. Сафонов, В. В. Результаты сравнительных испытаний добавок к моторным маслам «Кластер» и «Wagner» / В. В. Сафонов, А. В. Калужский, К. В. Сафонов // Научная жизнь. – 2017. – № 3. – С. 8–13.

132. Сафонов, В. В. Смазочная композиция с компонентами наноструктурных материалов / В. В. Сафонов, Э. К. Добринский // Машинно-технологическая станция. – 2004. – № 1. – С. 54–61.

133. 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.

134. Свойства и применение наноматериалов : учебное пособие / В. К. Воронцов [и др.]. – Старый Оскол : ТНТ, 2012. – 220 с.

135. Семин, А. Г. Повышение ресурса тракторных дизелей путем применения металлсодержащих смазочных композиций в условиях эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук / Семин Александр Григорьевич. – Саратов, 2000. – 186 с.

136. Синельников, А. Ф. Автомобильные масла : краткий справочник / А. Ф. Синельников, В. И. Балабанов. – М. : За рулём, 2005. – 176 с.

137. Синтез и изучение свойств стабилизатора металлического порошка в смазочной композиции / В. В. Сафонов [и др.] // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29. – № 1. – С. 108–123.

138. Синтез полититанатов калия, модифицированных в расплавах системы $\text{TiO}_2 - \text{KOH} - \text{K}_2\text{HPO}_4$, и трибологические свойства полученных продуктов / Н. О. Морозова [и др.] // Журнал неорганической химии. – 2020. – Т. 65. – № 6. – С. 731–738.

139. Справочник по триботехнике / под ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1989. – Т. 1. – 400 с.

140. Справочник по триботехнике / под ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1990. – Т. 2. – 420 с.

141. *Тарасов, А. И.* Оценка технического состояния двигателей в процессе эксплуатации и ремонта автомобилей : дис. ... канд. техн. наук / Тарасов Александр Иванович. – Орел, 2013. – 180 с.

142. Теоретическая оценка пригодности работающего моторного масла к проведению ремонтно-восстановительных операций / В. В. Остриков [и др.] // Наука в Центральной России. – 2013. – № 5. – С. 36–43.

143. Трибологические свойства антифрикционных суспензий на основе нанопорошков полититаната калия / А. В. Гороховский [и др.] // Нанотехника. – 2009. – № 3. – С. 42–44.

144. *Федоренко, В. Ф.* Нанотехнологии и наноматериалы в агропромышленном комплексе / В. Ф. Федоренко. – М. : Росинформагротех, 2007. – 96 с.

145. *Федорченко, И. М.* Влияние фосфора на антифрикционные свойства материала на основе легированного железа / И. М. Федорченко // Порошковая металлургия. – 1979. – № 11. – С. 99–101.

146. *Федоткин, И. М.* Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности / И. М. Федоткин, И. С. Гулый. – Киев : ОКО, 2000. – Ч. II. – 898 с.

147. *Цыганов, А. Р.* Влияние химического состава на трибологические свойства нанокompозитных материалов на основе полититаната калия, модифицированного слоистыми двойными гидроксидами / А. Р. Цыганов, А. В. Гороховский // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 5–1 (107). – С. 196–201.

148. *Чернышев, Г. Д.* Рабочий процесс и теплонапряженность автомобильных дизелей / Г. Д. Чернышев, А. С. Хачиян, В. И. Пикус. – М. : Машиностроение, 1996. – 216 с.

149. Экономика технического сервиса на предприятиях АПК : учебное пособие для вузов / Ю. А. Конкин [и др.] ; под общ. ред. Ю. А. Конкина. – М. : КолосС, 2005. – 368 с.

150. *Asseff, P. A.* Some Performance Characteristics of Hidrorefined Lubrication Oils / P. A. Asseff // Chem. Age india. – 1991. – 22. 1.

151. *Behrendt, C.* A Study of Diesel Fuel Injector Deposit Effects on Power and Fuel Economy Performance / C. Behrendt, A. Smith // 2017 SAE Technical Papers. – 2017. – March.

152. *Buchmeier, A.* Dürfen verschiedene Motorenöle gemischt wérden? / A. Buchmeier // Tractor und Zandmasch. – 1988. – 15.

153. CN104178262A. Композитная присадка для моторного смазочного масла. 2014-12-03 : реферат [Электронный ресурс] // База данных Espacenet. – Режим доступа : ru-i.espacenet.com (дата обращения 02.09.2023).

154. CN104178326A Нано-металлический комплексообразователь для моторного масла. 2014-12-03 : реферат [Электронный ресурс] // База данных Espacenet. – Режим доступа : ru-i.espacenet.com (дата обращения 02.09.2023).

155. CN104830432A (B). Состав присадки к моторному маслу и способ ее получения 2015-08-12 : реферат [Электронный ресурс] // База данных Espacenet. – Режим доступа : ru-i.espacenet.com (дата обращения 02.09.2023).

156. CN107353975A. Композиция смазочного масла для дизельных двигателей. 2017-11-17 : реферат [Электронный ресурс] // База данных Espacenet. – Режим доступа : ru-i.espacenet.com (дата обращения 02.09.2023).

157. Compatibility between Tribological Surfaces and Lubricant Additives – How Friction and Wear Reduction Can Be Controlled by Surface / Lube Synergies / A. Neville [et al.] // Tribology International. – 2007. – Vol. 40. – No. 10–12. – P. 1680–1695.

158. *Danson, W.* A Tutorial : PRISM. Journal of the RAC, Third Quarter, 1999, P. 1–6.

159. Dipl. Ing. Pillip Seewald. Assesment of Human Machin Interfa Concepts for Green Driving Support Sistems Transport Reeach / Dipl. Ing. Pillip Seewald // Arena. – 2014. – Paris.

160. *Klaus, E. E.* Effects of Some Physical and Chemical Properties of Lubricants on Boundary Lubrication / E. E. Klaus, H. E. Bieber // ASLE Trans. – 1994. – 7, 1.

161. Promising Formulations of Motor Oils with Nanodispersed Additives for Internal Combustion Engines / K. V. Safonov [et al.] // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2022. – Vol. 58. – No. 2. – P. 271–274.

162. *Smith, F. W.* Lubricant Behavior in Concentrated Contact – Some Rheological Problems / F. W. Smith // ASLE Trans. – 2000. – 3, 18.

163. *Stepina, V.* Ropa a Uhva / V. Stepina, M. Matejicek. – 1994. – I. – 16. – No. 1. – P. 369.

164. Synthesis and Study of Properties of a Metal Powder Stabilizer in a Lubricant Composition / V. V. Safonov [et al.] // Engineering Technologies and Systems. – 2019. – Vol. 29. – No. 1. – P. 108.–123.

165. US3541014A. Композиции смазочных материалов, содержащих молибден. 1970-11-17 : реферат [Электронный ресурс] // База данных Espacenet. – Режим доступа : ru-i.espacenet.com (дата обращения 02.09.2023).

166. US4164473A. Молибденорганические противоизносные присадки, снижающие трение. 1979-08-14 : реферат [Электронный ресурс] // База данных Espacenet. – Режим доступа : ru-i.espacenet.com (дата обращения 02.09.2023).

167. US4176073A. Молибденовые комплексы лактон-оксазолиновых диспергаторов в качестве уменьшающих трение противоизносных присадок к смазочным маслам. 1979-11-27 : реферат [Электронный ресурс] // База данных Espacenet. – Режим доступа : ru-i.espacenet.com (дата обращения 02.09.2023).

168. US4176074A. Молибденовые комплексы беззольных оксазолиновых диспергаторов в качестве снижающих трение противоизносных присадок к смазочным маслам. 1979-11-27 : реферат [Электронный ресурс] // База данных Espacenet. – Режим доступа : ru-i.espacenet.com (дата обращения 02.09.2023).

169. US4248720A. Молибденорганические противоизносные присадки, снижающие трение. 1981-02-03 : реферат [Электронный ресурс] // База данных Espacenet. – Режим доступа : ru-i.espacenet.com (дата обращения 02.09.2023).

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Результаты статистической обработки шероховатости поверхностей трения деталей,
работающих на смазочной композиции Лукойл 15W-40 + РЭД**

```

#include <iostream>
#include <fstream>
#include <string>
#include <locale>

using namespace std;

int main()
{
    setlocale(LC_CTYPE, "rus");
    ifstream fin;
    string dump, str1, str2;
    fin.open("data.txt");
    double lenght[12258];
    double height[12258];
    double credheight, credheightdown, credheightup;
    double sumup = 0, sumdown = 0, sumall = 0;
    int upcounter = 0, downcounter = 0, allcounter = 0;
    for (int i = 1; i <= 4; ++i) {
        fin >> dump;
    }

    for (int i = 0; i < 2000; ++i) {
        fin >> str1;
        fin >> str2;
        lenght[i] = stod(str1);
        height[i] = stod(str2);
    }

    if (height[0] > height[1])
    {
        sumall += height[0];
        allcounter++;
    }

    for (int i = 1; i < 1999; ++i) {
        if ((height[i] > height[i - 1]) && (height[i] > height[i + 1]))
        {
            sumall += height[i];
            allcounter++;
        }
    }
    if (height[1999] > height[1998])
    {
        sumall += height[0];
        allcounter++;
    }
    credheight = sumall / allcounter;
    if ((height[0] > credheight) && (height[0] > height[1]))
    {
        sumup += height[0];
        upcounter++;
    }

    for (int i = 1; i < 1999; ++i) {
        if ((height[i] > credheight) && (height[i] > height[i - 1]) && (height[i] >
height[i + 1]))

```

```

        {
            sumup += height[i];
            upcounter++;
        }
    }
    if ((height[1999] > credheight) && (height[1999] > height[1998]))
    {
        sumup += height[1999];
        upcounter++;
    }
    if ((height[0] < credheight) && (height[0] < height[1]))
    {
        sumdown += height[0];
        downcounter++;
    }

    for (int i = 1; i < 1999; ++i) {
        if ((height[i] < credheight) && (height[i] < height[i - 1]) && (height[i] <
height[i + 1]))
        {
            sumdown += height[i];
            downcounter++;
        }
    }
    if ((height[1999] < credheight) && (height[1999] < height[1998]))
    {
        sumdown += height[1999];
        downcounter++;
    }

    credheightdown = sumdown / downcounter;
    credheightup = sumup / upcounter;

    cout << "Среднее значение всех вершин" << endl;
    cout << credheight << endl;
    cout << "Среднее значение вершин выше среднего значения всех вершин" << endl;
    cout << credheightup << endl;
    cout << "Среднее значение впадин ниже среднего значения всех вершин" << endl;
    cout << credheightdown << endl;
    cout << "Разница между средними значениями вершин и впадин" << endl;
    cout << credheightup - credheightdown << endl;
    fin.close();
    system("pause");
}

```

**Результаты статистической обработки шероховатости поверхностей трения деталей,
работающих на базовом моторном масле Лукойл 15W-40**

```

#include <iostream>
#include <fstream>
#include <string>
#include <locale>

using namespace std;

int main()
{
    setlocale(LC_CTYPE, "rus");
    ifstream fin;
    string dump, str1, str2;
    fin.open("data.txt");
    double lenght[12258];
    double height[12258];
    double credheight, credheightdown, credheightup;
    double sumup = 0, sumdown = 0, sumall = 0;
    int upcounter = 0, downcounter = 0, allcounter = 0;
    for (int i = 1; i <= 4; ++i) {
        fin >> dump;
    }

    for (int i = 0; i < 12258; ++i) {
        fin >> str1;
        fin >> str2;
        lenght[i] = stod(str1);
        height[i] = stod(str2);
    }

    if (height[0] > height[1])
    {
        sumall += height[0];
        allcounter++;
    }

    for (int i = 1; i < 12257; ++i) {
        if ((height[i] > height[i-1] ) && (height[i] > height [i+1]))
        {
            sumall += height[i];
            allcounter++;
        }
    }
    if (height[12257] > height[12256])
    {
        sumall += height[0];
        allcounter++;
    }
    credheight = sumall / allcounter;

    if ((height[0] < credheight) && (height[0] > height[1]))
    {
        sumdown += height[0];
        downcounter++;
    }

    for (int i = 1; i < 12257; ++i) {
        if ((height[i] < credheight) && (height[i] > height[i - 1]) && (height[i] >
height[i + 1]))
        {
            sumdown += height[i];

```

```

        downcounter++;
    }
}
if ((height[12257] < credheight) && (height[12257] > height[12256]))
{
    sumdown += height[1999];
    downcounter++;
}

credheightdown = sumdown / downcounter;

if ((height[0] > credheight) && (height[0] > height[1]))
{
    sumup += height[0];
    upcounter++;
}

for (int i = 1; i < 12257; ++i) {
    if ((height[i] > credheight) && (height[i] > height[i - 1]) && (height[i] >
height[i + 1]))
    {
        sumup += height[i];
        upcounter++;
    }
}
if ((height[12257] > credheight) && (height[12257] > height[12256]))
{
    sumup += height[1999];
    upcounter++;
}

credheightup = sumup / upcounter;

cout << "Среднее значение всех вершин"<<endl;
cout << credheight << endl;
cout << "Среднее значение вершин ниже среднего значения всех вершин" << endl;
cout << credheightdown << endl;
cout << "Среднее значение вершин выше среднего значения всех вершин" << endl;
cout << credheightup << endl;
cout << "Разница между средними значениями выше и ниже среднего значения всех вершин"
<< endl;
cout << credheightup - credheightdown << endl;
fin.close();
system("pause");
}

```

**Обработка экспериментальных данных и оценка точности измерений
трибологических показателей смазочных композиций
при обосновании состава ремонтно-эксплуатационной добавки
к моторному маслу**

Износ образцов после 3 ч испытаний, мг

Смазочная композиция	Случайный результат x_k	Среднее арифметическое значение \bar{x}	$(x_k - \bar{x})^2$	Средняя квадратичная ошибка σ	Вероятностная ошибка r	Абсолютная ошибка m	Мера точности n
Лукойл 15W-40	17,8	18,2	0,16	0,38	0,25	0,22	1,84
	18,4		0,04				
	18,5		0,09				
Лукойл 15W-40 + + НРПМ	8,9	8,7	0,04	0,53	0,35	0,46	1,32
	8,1		0,36				
	9,1		0,16				
Лукойл 15W-40 + + НРПС	8,5	7,9	0,36	0,72	0,48	0,62	0,97
	8,1		0,04				
	7,1		0,64				
Лукойл 15W-40 + + УДПШТК	5,8	6,5	0,49	0,76	0,51	0,65	0,92
	6,4		0,01				
	7,3		0,64				
Лукойл 15W-40 + + НРПЛЛ	5,7	5,4	0,09	0,30	0,20	0,26	2,33
	5,4		0				
	5,1		0,09				
Лукойл 15W-40 + + УНРПЛП	3,2	2,4	0,64	0,72	0,48	0,62	0,97
	1,8		0,36				
	2,2		0,04				

Момент трения образцов после 3 ч испытаний, Н·м

Смазочная композиция	Случайный результат x_k	Среднее арифметическое значение \bar{x}	$(x_k - \bar{x})^2$	Средняя квадратичная ошибка σ	Вероятностная ошибка r	Абсолютная ошибка m	Мера точности n
Лукойл 15W-40	6,0	5,8	0,04	0,44	0,29	0,38	1,59
	6,1		0,09				
	5,3		0,25				
Лукойл 15W-40 + + НРПМ	5,9	5,3	0,36	0,72	0,48	0,62	0,97
	5,5		0,04				
	4,5		0,64				
Лукойл 15W-40 + + НРПС	4,2	4,2	0	0,50	0,49	1,21	0,50
	3,7		0,25				
	4,7		0,25				
Лукойл 15W-40 + + УДППТК	3,1	3,4	0,09	0,44	0,29	0,38	1,59
	3,9		0,25				
	3,2		0,04				
Лукойл 15W-40 + + НРПЛЛ	4,1	3,8	0,09	0,50	0,33	0,43	1,4
	3,2		0,36				
	4,0		0,04				
Лукойл 15W-40 + + УНРПЛП	3,0	3,2	0,04	0,38	0,25	0,22	1,84
	2,9		0,09				
	3,6		0,16				

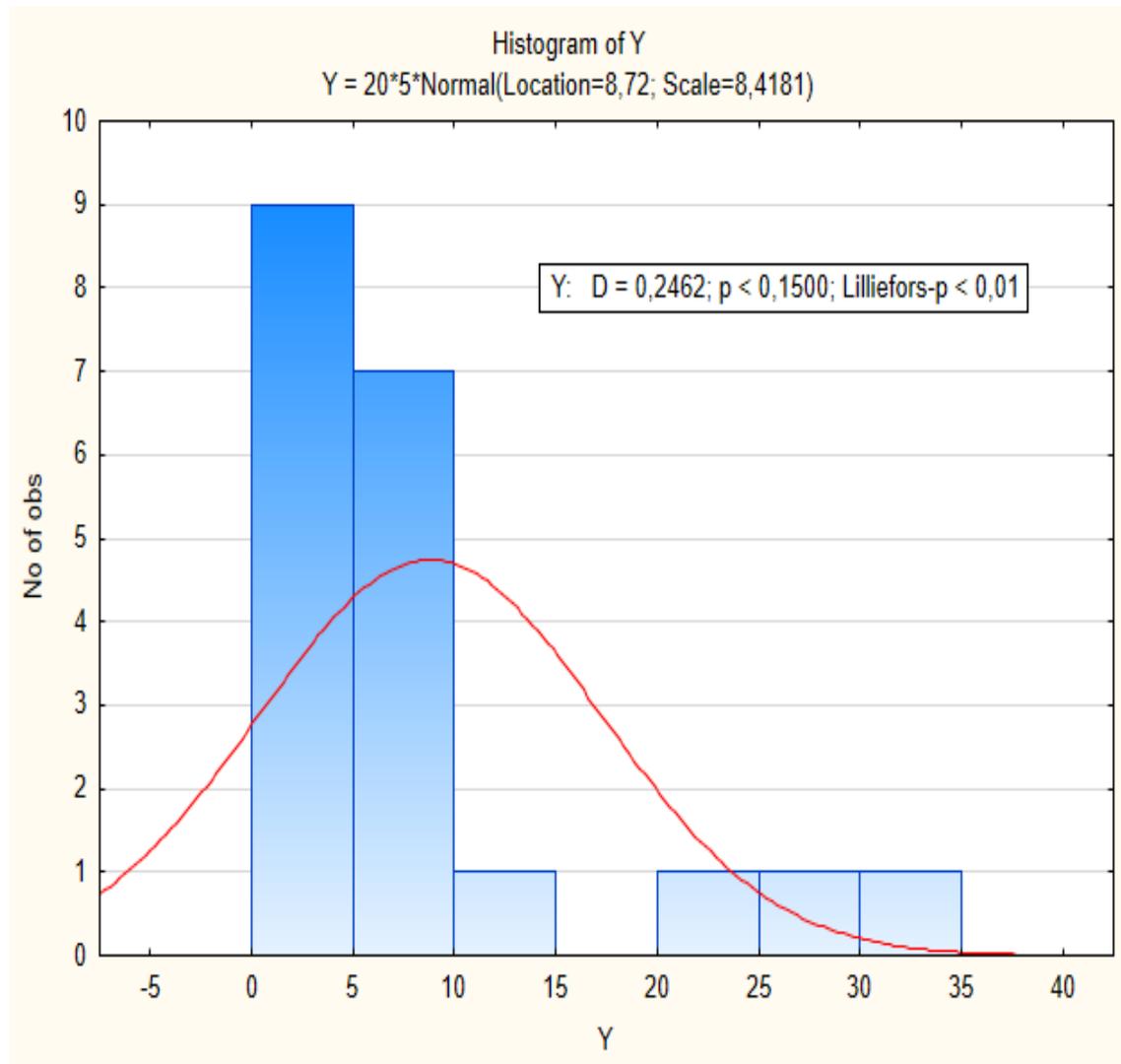
Изменение температуры поверхности трения образцов, °С

Смазочная композиция	Время, мин	Случайный результат x_k	Среднее арифметическое значение \bar{x}	$(x_k - \bar{x})^2$	Средняя квадратичная ошибка σ	Вероятностная ошибка r	Абсолютная ошибка m	Мера точности n
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Лукойл 15W-40	60	191	192	1,0	3,08	2,07	2,65	0,23
		195		9,0				
		189		9,0				
	120	190	188	4,0	5,92	3,96	5,09	0,12
		192		16,0				
		183		25,0				
	180	185	187	4,0	2,0	1,34	1,72	0,35
		189		4,0				
		187		0				
Лукойл 15W-40 + + НРПМ	60	191	188	9,0	4,36	2,92	3,75	0,16
		190		4,0				
		183		25,0				
	120	180	184	4,0	4,69	3,14	4,03	0,15
		182		4,0				
		190		36,0				
	180	179	182	9,0	7,58	5,08	6,52	0,09
		177		25,0				
		191		81,0				

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
Лукойл 15W-40 + + НРПС	60	182	184	4,0	5,29	3,55	4,55	0,13
		190		36,0				
		180		16,0				
	120	183	183	0	4,0	2,68	3,44	0,18
		179		16,0				
		187		16,0				
	180	180		4,0				
		181	178	9,0	3,81	2,55	3,28	0,18
		174		16,0				
	Лукойл 15W-40 + + УДПШТК	60	182	184	4,0	2,12	1,42	1,82
186			4,0					
183			1,0					
120		177	180	9,0	4,36	2,92	3,75	0,16
		178		4,0				
		185		25,0				
180		179	174	25,0	6,24	4,18	5,37	0,11
		176		4,0				
		167		49,0				
Лукойл 15W-40 + + НРПЛЛ		60	178	183	25,0	7,42	4,97	6,38
	181		4,0					
	191		81,0					
	120	181	178	9,0	7,94	5,32	6,83	0,9
		184		36,0				
		169		81,0				
	180	171	172	1,0	4,06	2,72	3,49	0,17
		176		16,0				
		168		16,0				
	Лукойл 15W-40 + + УНРПЛП	60	183	180	9,0	4,36	2,92	3,75
175			25,0					
182			4,0					
120		168	173	25,0	7,58	5,08	6,52	0,09
		170		9,0				
		182		81,0				
180		170	166	16,0	5,29	3,55	4,55	0,13
		168		4,0				
		160		36,0				

Матрица планирования и результаты экспериментов

№ опыта	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	x_1 , г/4 л	x_2 , г/4 л	x_3 , г/4 л	y'_i
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1	1,8	0,5	12,8
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	3,5	1,8	0,5	32,8
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	1	7	0,5	10
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	3,5	7	0,5	6,8
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	1	1,8	2	21,2
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	3,5	1,8	2	25,6
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	1	7	2	7,6
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	3,5	7	2	6
9	+1,680	0	0	0	0	0	+2,822	0	0	1,1	4,4	1,25	0,4
10	-1,680	0	0	0	0	0	+2,822	0	0	3,1	4,4	1,25	3,2
11	0	+1,680	0	0	0	0	0	+2,822	0	2,25	3,37	1,25	4,8
12	0	-1,680	0	0	0	0	0	+2,822	0	2,25	5,37	1,25	6,4
13	0	0	+1,680	0	0	0	0	0	+2,822	2,25	4,4	0,26	8,8
14	0	0	-1,680	0	0	0	0	0	+2,822	2,25	4,4	2,26	8
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,25	4,4	1,25	3,6
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,25	4,4	1,25	3,2
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,25	4,4	1,25	3,2
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,25	4,4	1,25	3,2
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,25	4,4	1,25	3,6
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,25	4,4	1,25	3,2

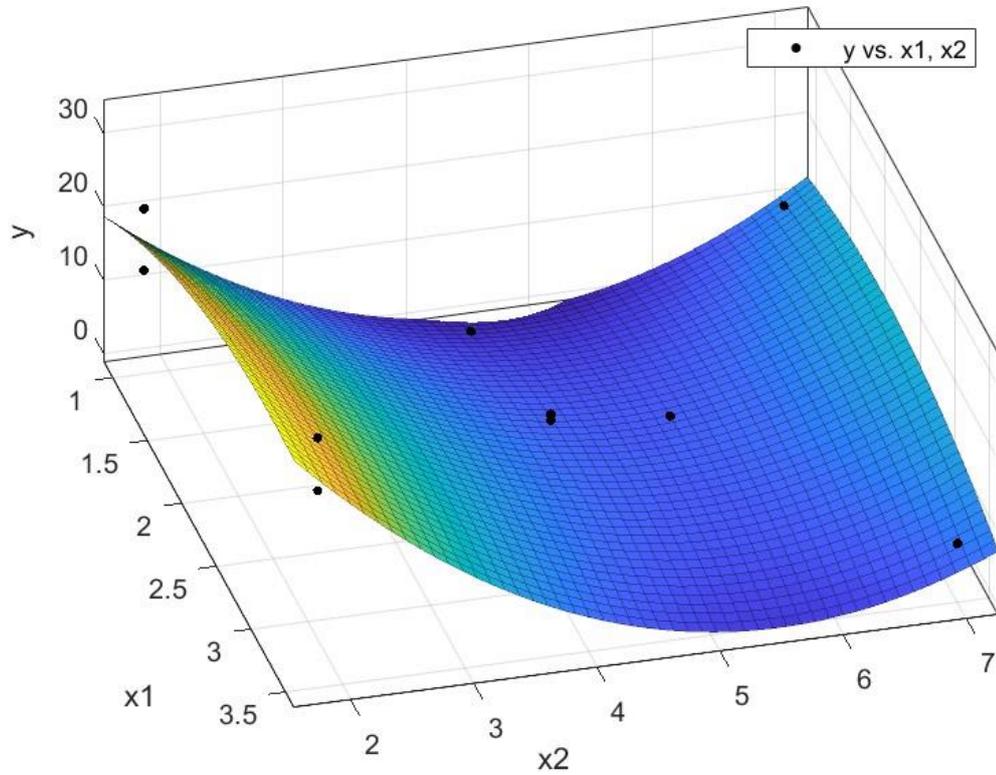


Результаты множественной регрессии в численном виде

Regression Summary for Dependent Variable: Y (Spreadsheet in Workbook1)						
R= ,97434465 R?= ,94934750 Adjusted R?= ,90376026						
F(9,10)=20,825 p<,00002 Std.Error of estimate: 2,6115						
N=20	b*	Std.Err.	b	Std.Err.	t(10)	p-value
Intercept			27,6166	6,366685	4,33767	0,001472
X1	1,48489	0,862729	14,2889	8,301890	1,72116	0,115956
X2	-2,89977	0,825617	-14,2084	4,045391	-3,51224	0,005611
X3	-0,50921	0,415344	-7,3287	5,977740	-1,22600	0,248284
X1X2	-0,78026	0,197376	-1,1231	0,284095	-3,95317	0,002716
X1X3	-0,40269	0,212460	-1,8667	0,984864	-1,89535	0,087288
X2X3	-0,12004	0,201521	-0,2821	0,473492	-0,59568	0,564625
X1_2	-0,54238	0,858624	-1,1500	1,820610	-0,63168	0,541766
X2_2	2,97672	0,822630	1,6187	0,447346	3,61854	0,004701
X3_2	0,88857	0,360558	4,9542	2,010277	2,46444	0,033422

Statistic	Summary Statistics; DV: Y (Spreadsheet in Workbook1)
	Value
Multiple R	0,974345
Multiple R?	0,949348
Adjusted R?	0,90376
F(9,10)	20,82485
p	2,45E-05
Std.Err. of Estimate	2,611516

Построение поверхности отклика



Custom Surface Fit

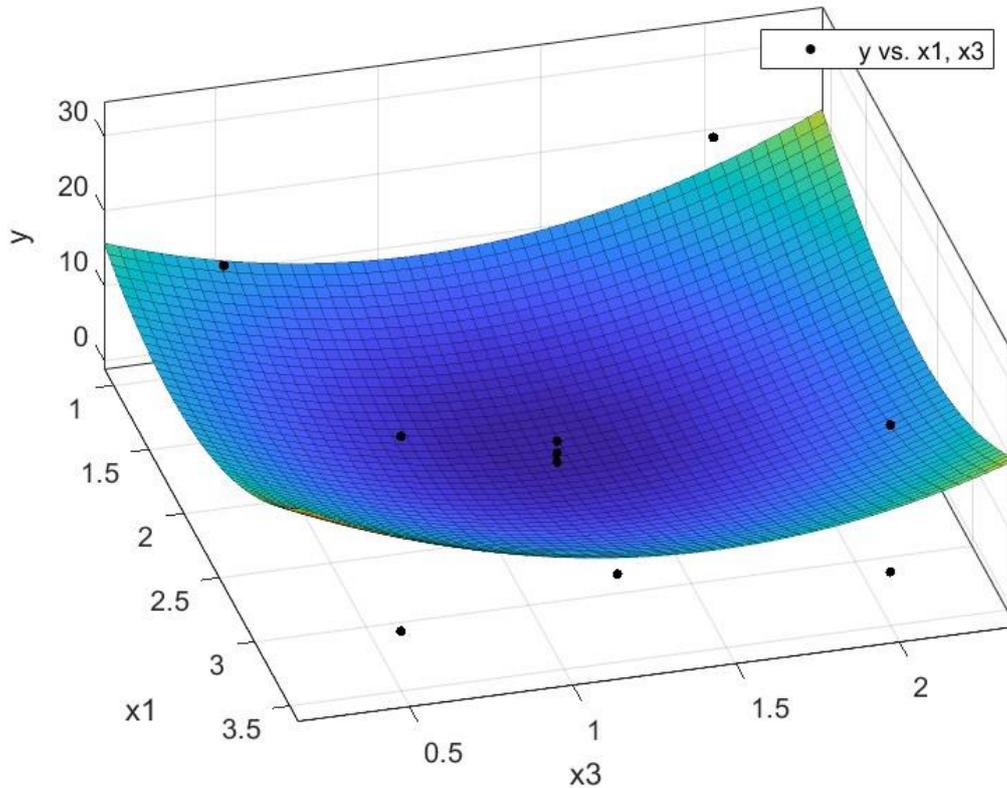
$$f(x_1, x_2) = a + b \cdot x_1 + c \cdot x_2 + d \cdot x_1 \cdot x_2 + e \cdot x_1^2 + f \cdot x_2^2$$

Coefficients and 95% Confidence Bounds

	Value	Lower	Upper
a	29.8340	12.8424	46.8255
b	17.4230	-10.3000	45.1459
c	-18.1513	-30.3159	-5.9867
d	-1.1231	-2.0471	-0.1991
e	-2.3735	-8.5255	3.7785
f	2.0271	0.6707	3.3835

Goodness of Fit

SSE	126.8855
R-square	0.8896
DFE	9.0000
Adj R-sq	0.8282
RMSE	3.7548



Custom Surface Fit

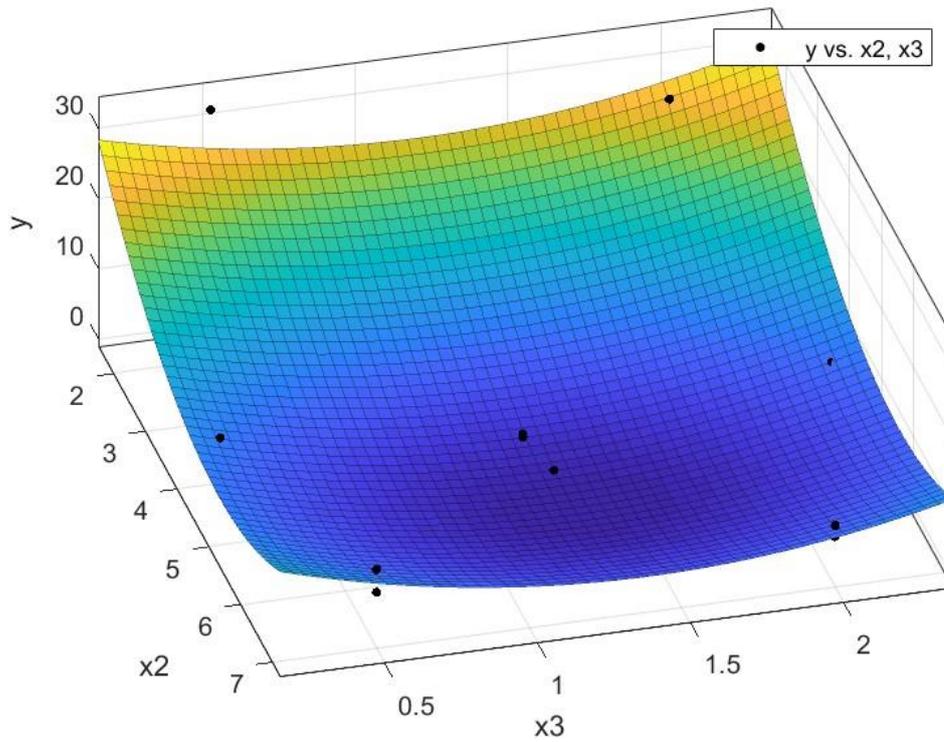
$$f(x1, x3) = a + b \cdot x1 + c \cdot x3 + d \cdot x1 \cdot x3 + e \cdot x1^2 + f \cdot x3^2$$

Coefficients and 95% Confidence Bounds

	Value	Lower	Upper
a	29.5816	-11.9922	71.1554
b	-17.1432	-52.1132	17.8267
c	-16.0585	-59.9288	27.8118
d	-1.8667	-9.4974	5.7641
e	4.8150	-2.6444	12.2743
f	7.9399	-7.8418	23.7215

Goodness of Fit

SSE	720.0513
R-square	0.3733
DFE	9.0000
Adj R-sq	0.0252
RMSE	8.9446



Custom Surface Fit

$$f(x_2, x_3) = a + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + d \cdot x_2 \cdot x_3 + e \cdot x_2^2 + f \cdot x_3^2$$

Coefficients and 95% Confidence Bounds

	Value	Lower	Upper
a	49.5152	27.3808	71.6496
b	-14.6642	-24.2755	-5.0528
c	-12.2950	-39.3245	14.7346
d	-0.2821	-2.4636	1.8995
e	1.3833	0.3519	2.4146
f	5.2600	-4.6363	15.1563

Goodness of Fit

SSE	254.6059
R-square	0.7784
DFE	9.0000
Adj R-sq	0.6553
RMSE	5.3188

**Обработка экспериментальных данных и оценка точности измерений
трибологических показателей при сравнении смазочных композиций
с разработанной ремонтно-эксплуатационной добавкой и без нее**

Момент трения образцов после 3 ч испытаний, Н·м

Смазочная композиция	Случайный результат x_k	Среднее арифметическое значение \bar{x}	$(x_k - \bar{x})^2$	Средняя квадратичная ошибка σ	Вероятностная ошибка r	Абсолютная ошибка m	Мера точности n
Лукойл 15W-40	6,0	5,5	0,25	0,5	0,34	0,43	1,40
	5,5		0				
	5,0		0,25				
Лукойл 15W-40 + РЭД	2,9	2,5	0,16	0,38	0,26	0,33	1,82
	2,3		0,04				
	2,2		0,09				

Изменение температуры поверхности трения образцов после 3 ч испытаний, °С

Смазочная композиция	Случайный результат x_k	Среднее арифметическое значение \bar{x}	$(x_k - \bar{x})^2$	Средняя квадратичная ошибка σ	Вероятностная ошибка r	Абсолютная ошибка m	Мера точности n
Лукойл 15W-40	188	185	9,0	4,36	2,92	3,75	0,16
	180		25,0				
	187		4,0				
Лукойл 15W-40 + РЭД	156	162	36,0	5,29	3,55	4,55	0,31
	166		16,0				
	164		4,0				

Износ образцов трения после 3 ч испытаний, мг

Смазочная композиция	Случайный результат x_k	Среднее арифметическое значение \bar{x}	$(x_k - \bar{x})^2$	Средняя квадратичная ошибка σ	Вероятностная ошибка r	Абсолютная ошибка m	Мера точности n
Лукойл 15W-40	17,8	18,2	0,16	0,38	0,25	0,22	1,84
	18,4		0,04				
	18,5		0,09				
Лукойл 15W-40 + РЭД	1,9	2,0	0,01	0,36	0,24	0,31	1,94
	2,4		0,16				
	1,7		0,09				

Приложение 8

Обработка экспериментальных данных и оценка точности измерений исследований седиментационной устойчивости добавки предлагаемого состава, %

Продолжительность обработки ультразвуком, мин	Время выдержки, ч	Случайный результат x_k	Среднее арифметическое значение \bar{x}	$(x_k - \bar{x})^2$	Средняя квадратичная ошибка σ	Вероятностная ошибка r	Абсолютная ошибка m	Мера точности n
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	24	90	92	4,0	2,0	1,34	1,72	0,35
		92		0				
		94		4,0				
	48	93	91	4,0	3,81	2,55	3,28	0,18
		94		9,0				
		87		16,0				
	72	80	83	9,0	3,0	2,01	2,58	0,23
		86		9,0				
		83		0				

Окончание прил. 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	24	95	93	4,0	4,36	2,92	3,75	0,16
		96		9,0				
		88		25,0				
	48	82	89	49,0	6,44	4,32	5,54	0,11
		92		9,0				
		94		25,0				
	72	76	81	25,0	5,57	3,73	4,79	0,13
		80		1,0				
		87		36,0				
30	24	89	95	36,0	5,29	3,54	4,55	0,13
		97		4,0				
		99		16,0				
	48	90	88	4,0	4,36	2,92	3,75	0,16
		83		25,0				
		91		9,0				
	72	78	80	4,0	4,36	2,92	3,75	0,16
		85		25,0				
		77		9,0				
Без обработки	24	103	100	9,0	6,08	4,07	5,23	0,12
		104		16,0				
		93		49,0				
	48	97	99	4,0	2,12	1,42	1,82	0,33
		100		1,0				
		101		4,0				
	72	96	93	9,0	2,65	1,78	2,28	0,26
		92		1,0				
		91		4,0				

Приложение 9

Суммарный износ образцов трения после 3 ч испытаний, мг

Смазочная композиция	Случайный результат x_k	Среднее арифметическое значение \bar{x}	$(x_k - \bar{x})^2$	Средняя квадратичная ошибка σ	Вероятностная ошибка r	Абсолютная ошибка m	Мера точности n
Лукойл 15W-40	42,9	42,8	0,01	1,95	1,31	1,68	0,36
	40,8		4,0				
	44,7		3,61				
Лукойл 15W-40 + РЭД	13,6	14,2	0,36	0,78	0,52	0,67	0,90
	14,0		0,04				
	15,1		0,81				

**Обработка экспериментальных данных и оценка точности измерений
показателей изменения физико-механических свойств
предлагаемой смазочной композиции**

***Изменение вязкости кинематической базового моторного масла в зависимости
от концентрации разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки***

Смазочная композиция	Концентрация добавки, %	Случайный результат x_k	Среднее арифметическое значение \bar{x}	$(x_k - \bar{x})^2$	Средняя квадратичная ошибка σ	Вероятностная ошибка r	Абсолютная ошибка m	Мера точности n
Лукойл 15W-40 + РЭД	0,1	12,9	12,9	0	0,1	0,07	0,09	7,0
		12,8		0,01				
		13,0		0,01				
	0,2	13,2	13,0	0,04	0,2	0,13	0,17	3,5
		12,8		0,04				
		13,0		0				
	0,3	12,9	13,1	0,04	0,2	0,13	0,17	3,5
		13,1		0				
		13,3		0,04				

***Изменение щелочного числа базового моторного масла в зависимости
от концентрации разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки***

Смазочная композиция	Концентрация добавки, %	Случайный результат x_k	Среднее арифметическое значение \bar{x}	$(x_k - \bar{x})^2$	Средняя квадратичная ошибка σ	Вероятностная ошибка r	Абсолютная ошибка m	Мера точности n
Лукойл 15W-40+ РЭД	0,1	6,2	6,5	0,09	0,38	0,26	0,33	1,84
		6,9		0,16				
		6,3		0,04				
	0,2	6,4	6,6	0,04	0,2	0,13	0,17	3,5
		6,6		0				
		6,8		0,04				
	0,3	6,7	6,8	0,01	0,26	0,18	0,22	2,69
		6,6		0,04				
		7,1		0,09				

Изменение кислотного числа базового моторного масла в зависимости от концентрации разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки

Смазочная композиция	Концентрация добавки, %	Случайный результат X_k	Среднее арифметическое значение \bar{x}	$(x_k - \bar{x})^2$	Средняя квадратичная ошибка σ	Вероятностная ошибка r	Абсолютная ошибка m	Мера точности n
Лукойл 15W-40 + РЭД	0,1	4,2	4,1	0,01	0,1	0,07	0,09	7,0
		4,0		0,01				
		4,1		0				
	0,2	4,2	4,2	0	0,1	0,07	0,09	7,0
		4,3		0,01				
		4,1		0,01				
	0,3	4,5	4,3	0,04	0,26	0,18	0,22	2,69
		4,4		0,01				
		4,0		0,09				

Изменение содержания механических примесей в базовом моторном масле в зависимости от концентрации разработанной ремонтно-эксплуатационной добавки

Смазочная композиция	Концентрация добавки, %	Случайный результат X_k	Среднее арифметическое значение \bar{x}	$(x_k - \bar{x})^2$	Средняя квадратичная ошибка σ	Вероятностная ошибка r	Абсолютная ошибка m	Мера точности n
Лукойл 15W-40 + РЭД	0,1	0,015	0,02	0,00003	0,007	0,005	0,006	100
		0,025		0,00003				
		0,020		0				
	0,2	0,025	0,03	0,00003	0,007	0,005	0,006	100
		0,030		0				
		0,035		0,00003				
	0,3	0,050	0,05	0	0,007	0,005	0,006	100
		0,045		0,00003				
		0,055		0,00003				

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2525238

СМАЗОЧНАЯ КОМПОЗИЦИЯ

Патентообладатель(ли): **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)**

Автор(ы): **с.м. на обороте**

Заявка № **2013116082**

Приоритет изобретения **09 апреля 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **17 июня 2014 г.**

Срок действия патента истекает **09 апреля 2033 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ (19)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ **RU**

(11)

2 525 238

(13)

C1(51) МПК
[C10M 125/00 \(2006.01\)](#)
[C10M 125/04 \(2006.01\)](#)
[B82B 3/00 \(2006.01\)](#)
[C01G 23/00 \(2006.01\)](#)
[C10N 30/06 \(2006.01\)](#)**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**Статус: не действует (последнее изменение статуса: 02.07.2021)
Пошлина: Возможность восстановления: нет.

<p>(21)(22) Заявка: 2013116082/04, 09.04.2013</p> <p>(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 09.04.2013</p> <p>Приоритет(ы):</p> <p>(22) Дата подачи заявки: 09.04.2013</p> <p>(45) Опубликовано: 10.08.2014 Бюл. № 22</p> <p>(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: EP 1329421 A1, 23.07.2003. RU 2420459 C1, 10.06.2011. RU 2123030 C1, 10.12.1998. US 6228813 B1, (08.05.2001</p> <p>Адрес для переписки: 410012, г.Саратов, Театральная пл., 1, ФГБОУ ВПО "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова", патентный отдел</p>	<p>(72) Автор(ы): Сафонов Валентин Владимирович (RU), Добринский Эдуард Константинович (RU), Гороховский Александр Владиленович (RU), Буйлов Валерий Николаевич (RU), Сафонов Константин Валентинович (RU), Галкин Александр Александрович (RU)</p> <p>(73) Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)</p>
---	--

(54) СМАЗОЧНАЯ КОМПОЗИЦИЯ**(57) Реферат:**

Настоящее изобретение относится к смазочной композиции, содержащей минеральное масло и порошкообразный наполнитель, полученный при испарении и конденсации пара в плазменном испарителе, при этом масло в качестве порошкообразного наполнителя содержит смесь наноразмерного порошка латуни дисперсностью 10... 30 нм, ультрадисперсного порошка полтитаната калия интеркалированного цинком дисперсностью 100... 300 нм и поверхностно-активное вещество, причем ультрадисперсный порошок полтитаната калия интеркалированного цинком получен химическим методом, при следующем соотношении компонентов в масс. %:

порошкообразный наполнитель, состоящий из

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ (19)
 ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ **RU**

(11)

2 493 104

(13)

C1

(51) МПК
 C01G 23/00 (2006.01)
 C01D 13/00 (2006.01)
 C04B 35/462 (2006.01)
 C10M 125/10 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: не действует (последнее изменение статуса: 04.08.2022)
 Пошлина: учтена за 7 год с 04.02.2018 по 03.02.2019. Возможность восстановления: нет.

<p>(21)(22) Заявка: 2012103825/05, 03.02.2012</p> <p>(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 03.02.2012</p> <p>Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 03.02.2012</p> <p>(45) Опубликовано: 20.09.2013 Бюл. № 26</p> <p>(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2420459 C1, 10.06.2011. RU 2412980 C1, 27.02.2011. EP 2138461 A1, 30.12.2009. EP 1329421 B1, 01.03.2006. US 20100112350 A1, 06.05.2010.</p> <p>Адрес для переписки: 410000, г.Саратов, Главпочтамт, а/я 73, пат.пов. В.Д. Куликову</p>	<p>(72) Автор(ы): Гороховский Александр Владиленович (RU), Азаров Александр Сергеевич (RU), Палагин Анатолий Иванович (RU), Третьяченко Елена Васильевна (RU), Сафонов Валентин Владимирович (RU), Сафонов Константин Валентинович (RU)</p> <p>(73) Патентообладатель(и): Гороховский Александр Владиленович (RU), Азаров Александр Сергеевич (RU)</p>
---	--

(54) ПОРОШОК ТИТАНАТА КАЛИЯ И СМАЗОЧНАЯ КОМПОЗИЦИЯ НА ЕГО ОСНОВЕ**(57) Реферат:**

Изобретение относится к технологии производства антифрикционных добавок и смазочных композиций для использования в узлах трения качения и скольжения в автомобильной, машиностроительной, текстильной, химической и других отраслях промышленности. Порошок титаната калия состоит из слоистых частиц чешуйчатой формы субмикронного размера, интеркалированных ионами, по крайней мере, одного переходного металла. Частицы титаната калия могут быть одновременно интеркалированы ионами, по крайней мере, одного переходного металла и одним видом поверхностно-активного вещества. Смазочная композиция содержит антифрикционную добавку и смазочный материал, в качестве которого может выступать базовая пластичная смазка либо базовое минеральное, полусинтетическое или синтетическое масло. При этом в качестве антифрикционной добавки используют порошок титаната калия, состоящий из слоистых частиц чешуйчатой формы

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПРОМЫШЛЕННЫЙ ОБРАЗЕЦ

№ 78051

**КОМПЛЕКТ УПАКОВКИ С ЭТИКЕТКОЙ ДЛЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ
ПРИСАДКИ "КЛАСТЕР"**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2009503695

Приоритет(ы) промышленного образца 28 декабря 2009 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре промышленных образцов Российской Федерации 16 апреля 2011 г.

Срок действия исключительного права

на промышленный образец истекает 28 декабря 2024 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

Автор(ы): Сафонов Валентин Владимирович (RU); Добринский
Эдуард Константинович (RU); Александров Владислав
Александрович (RU); Сафонов Константин Валентинович (RU)

(12

Пр

(2:

(7:

(54

"КГ

(5E

0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
K

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) **RU** (11) **78051**(51) МКПО⁹ **09-03;**
19-08

(15) Дата регистрации: 16.04.2011

(21) Номер заявки: 2009503695

(22) Дата подачи заявки: 28.12.2009

(24) Дата начала отсчета срока
действия патента: 28.12.2009

(45) Дата публикации: 16.04.2011

(12) **ПАТЕНТ НА ПРОМЫШЛЕННЫЙ ОБРАЗЕЦ**

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.12.2009

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования "Саратовский государственный
аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)

(72) Автор(ы):

Сафонов Валентин Владимирович (RU);
Добринский Эдуард Константинович (RU);
Александров Владислав Александрович (RU);
Сафонов Константин Валентинович (RU)

Адрес для переписки:

410012, г. Саратов, Театральная пл., 1, ФГОУ
ВПО "Саратовский государственный аграрный
университет имени Н.И. Вавилова", патентный
отдел

(54) КОМПЛЕКТ УПАКОВКИ С ЭТИКЕТКОЙ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ПРИСАДКИ
"КЛАСТЕР"

(55)(57)Комплект упаковки с этикеткой,



RU 78051 S

С
Л
О
В
Н
И
К

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2507243

СМАЗОЧНАЯ КОМПОЗИЦИЯ

Патентообладатель(ли): *Государственное научное учреждение
Всероссийский научно-исследовательский институт использования
техники и нефтепродуктов Российской академии
сельскохозяйственных наук (ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии)
(RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013101358

Приоритет изобретения 10 января 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 20 февраля 2014 г.

Срок действия патента истекает 10 января 2033 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**RU**

(11)

2 507 243

(13)

C1

(51) МПК

[C10M 125/00 \(2006.01\)](#)[C10M 125/04 \(2006.01\)](#)[C10M 125/22 \(2006.01\)](#)[C10M 125/24 \(2006.01\)](#)[C10M 171/06 \(2006.01\)](#)[C10N 30/06 \(2006.01\)](#)**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**Статус: не действует (последнее изменение статуса: 02.07.2021)
Пошлина: Возможность восстановления: нет.(21)(22) Заявка: [2013101358/04](#), 10.01.2013(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.01.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 10.01.2013

(45) Опубликовано: [20.02.2014](#) Бюл. № [5](#)(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2260035 C1, 10.09.2005. RU
2019562 C1, 15.09.1994. RU 2089598 C1,
10.09.1997. SU 1803419 A1, 23.03.1993. RU
2161177 C1, 27.12.2000. US 4155860 A,
22.05.1979. RU 2107090 C1, 20.03.1998. EP
0420626 B1, 21.06.1995. SU 0231056 A1,
15.11.1968.

Адрес для переписки:

392022, г. Тамбов, пер. Ново-Рубежный, 28,
ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии, В.В.
Острикову

(72) Автор(ы):

Остриков Валерий Васильевич (RU),
Сафонов Валентин Владимирович (RU),
Попов Сергей Юрьевич (RU),
Сафонов Константин Валентинович (RU),
Зимин Александр Геннадьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное научное учреждение
Всероссийский научно-исследовательский
институт использования техники и
нефтепродуктов Российской академии
сельскохозяйственных наук (ГНУ
ВНИИТиН Россельхозакадемии) (RU)**(54) СМАЗОЧНАЯ КОМПОЗИЦИЯ**

(57) Реферат:

Настоящее изобретение относится к смазочной композиции, содержащей минеральное масло и порошкообразный наполнитель, состоящий из смеси наноразмерных порошков дисульфида молибдена и сплава порошков латуни и фосфора, полученных при испарении и конденсации пара в плазменном испарителе с соотношением компонентов, мас. %: 55:30:15, разбавленных в минеральном масле, при этом в композицию добавляют 15% раствора карбамида в 10% водном растворе

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «АВТОРЕМОНТ»

Болтаев Д.В.

«28» ноября 2014 г.



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и
инновационной работе

ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ»

И.Л. Воротников

«28» ноября 2014 г.



А К Т

ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ
АВТОМОБИЛЕЙ КАМАЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ В СОСТАВЕ МОТОРНОГО
МАСЛА НАНОКОМПОЗИЦИОННОЙ ПРИСАДКИ "КЛАСТЕР-ЛП"

Комиссия в составе представителей ООО «АВТОРЕМОНТ» – инженера В.Н. Прошкина, мастера П.Ю. Фирсова и представителей ФГБОУ ВПО "Саратовский ГАУ" – профессора, доктора технических наук В.В. Сафонова, кандидата технических наук А.С. Азарова и аспиранта К.В. Сафонова, составила настоящий акт в том, что с 3 апреля по 28 ноября 2014 года в ООО «АВТОРЕМОНТ» проведены эксплуатационные испытания шести автомобилей КАМАЗ, укомплектованных дизелями КАМАЗ 7403.10-260.

Из этого количества три дизеля работали на моторном масле Лукойл 15W40, другие три – на моторном масле Лукойл 15W40 с добавлением в его состав разработанной наноконпозиционной присадки "Кластер-ЛП".

Цель проведения испытаний – установление степени влияния разработанной присадки на ресурс сопряжения "поршневое кольцо–гильза" дизелей автомобилей КАМАЗ.

Сравнительная оценка долговечности изучаемого сопряжения при использовании в эксплуатации товарного моторного масла Лукойл 15W40 и смазочной композиции, содержащей моторное масло Лукойл 15W40 и присадку "Кластер-ЛП", производилась с помощью методики прогнозирования остаточного ресурса по ГОСТ 27.302-86 "Надежность в технике. Методы определения допустимого отклонения параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов машин". В качестве контролируемого параметра технического состояния сопряжения "поршневое кольцо–гильза", по которому производили расчет остаточного ресурса, использовали величину расхода картерных газов.

Для повышения точности прогнозирования замеры параметров на каждом из двигателей производили дважды, через каждые 19200 км пробега автомобиля. Замер параметров совмещали с проведением соответствующего технического обслуживания.

По результатам испытаний на 28 ноября 2014 года установлено, что:

– условия эксплуатации двух групп автомобилей КАМАЗ одинаковы и соответствуют техническим требованиям;

– серьёзных отказов и неисправностей при эксплуатации подконтрольных двигателей не наблюдалось;

– обработка полученных данных показала, что прогнозируемый остаточный ресурс сопряжения "поршневое кольцо–гильза" дизелей автомобилей КАМАЗ, эксплуатировавшихся на моторном масле с нанокпозиционной присадкой "Кластер-ЛПТ", увеличился в среднем в 2,15 раза, по сравнению с ресурсом дизелей, работавших на товарном масле Лукойл 15W40.

– испытания двигателей КАМАЗ 7403.10-260 на масле с разработанной присадкой продолжаются.

Представители

ООО «АВТОРЕМОНТ»:

Инженер

 В.Н. Прошкин

«28» ноября 2014 г.

Мастер

 П.Ю. Фирсов

«28» ноября 2014 г.



Представители

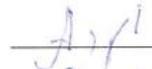
ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ»:

Д-р техн. наук, профессор

 В.В. Сафонов

«28» ноября 2014 г.

Канд. техн. наук, доцент

 А.С. Азаров

«28» ноября 2014 г.

Аспирант

 К.В. Сафонов

«28» ноября 2014 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «АВТОРЕМОНТ»

 Болтаев Д.В.«28» кадбрс 2014 г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и
инновационной работе

ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ»

 И.Л. Воротников
«28» кадбрс 2014 г.**А К Т****ВНЕДРЕНИЯ НАНОКОМПОЗИЦИОННОЙ ПРИСАДКИ
К МОТОРНОМУ МАСЛУ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ КАМАЗ,
УКОМПЛЕКТОВАННЫХ ДИЗЕЛЯМИ КАМАЗ 7403.10-260**

Комиссия в составе представителей ООО «АВТОРЕМОНТ» – инженера В.Н. Прошкина, мастера П.Ю. Фирсова и представителей ФГБОУ ВПО "Саратовский ГАУ" – профессора, доктора технических наук В.В. Сафонова, кандидата технических наук А.С. Азарова и аспиранта К.В. Сафонова, составила настоящий акт в том, что на основании положительных результатов эксплуатационных испытаний, проводившихся с апреля по ноябрь 2014 года с использованием автомобилей КАМАЗ в ООО «АВТОРЕМОНТ» считать внедренным метод повышения долговечности дизелей автомобилей КАМАЗ за счет введения в состав моторного масла наноконпозиционной присадки "Кластер-ЛП".

В процессе внедрения выполнен следующий объем работ:

1. В ФГБОУ ВПО "Саратовский ГАУ" приготовлена и передана ООО «АВТОРЕМОНТ», разработанная присадка "Кластер-ЛП" в количестве 30 кг.
2. Проведены эксплуатационные испытания автомобилей КАМАЗ, укомплектованных дизелями КАМАЗ 7403.10-260, с использованием в составе моторного масла наноконпозиционной присадки "Кластер-ЛП". Прогнозируемый остаточный ресурс дизелей, испытанных на масле с наноконпозиционной при-

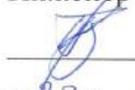
садкой, увеличился в среднем в 2,15 раза, по сравнению с остаточным ресурсом двигателей, работавших на масле Лукойл 15W40.

3. Годовой экономический эффект от внедрения нанокomпозиционной присадки к моторному маслу "Кластер-ЛП" составил в среднем 4450 руб. на один дизель автомобилей КАМАЗ подконтрольной группы.

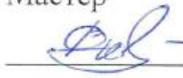
Представители

ООО «АВТОРЕМОНТ»:

Инженер

 В.Н. Прошкин«28» ноября 2014 г.

Мастер

 П.Ю. Фирсов«28» ноября 2014 г.

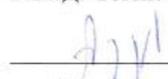
Представители

ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ»:

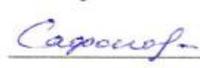
Д-р техн. наук, профессор

 В.В. Сафонов«28» ноября 2014 г.

Канд. техн. наук, доцент

 А.С. Азаров«28» ноября 2014 г.

Аспирант

 К.В. Сафонов«28» ноября 2014 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «Агрофирма «Рубеж»


_____ Артемов П.А.
"20" ноября 2020 г.


УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ


_____ Воротников И.Л.
"20" ноября 2020 г.


А К Т

проведения эксплуатационных испытаний добавки "Кластер-В" к моторному
маслу дизелей КамАЗ -740

Комиссия в составе представителей ООО «Агрофирма «Рубеж»: зам. генерального директора на производственном участке Банталова А.П., инженера по эксплуатации МТП Нагаева В.С., помощника механика Зайцева С.В. и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ: профессора, доктора технических наук Сафонова В.В., доцента кандидата технических наук Буйлова В.Н., ст. преподавателя Сафонова К.В. составила настоящий акт в том, что в ООО «Агрофирма «Рубеж» были проведены эксплуатационные испытания шести капитально отремонтированных дизелей КамАЗ -740, установленных на автомобилях КамАЗ. Из этого количества 3 дизеля смазывались базовым моторным маслом Лукой 15W40, другие 3 – моторным маслом Лукой 15W40 с добавкой "Кластер-В".

Разработанная эксплуатационно-восстановительная добавка к моторному маслу ("Кластер-В"), представляющая собой седиментационно-устойчивую суспензию смеси двух компонентов – ультра-наноразмерного порошка сплава латуни с серой и фосфором, ультра-наноразмерного порошка полититаната калия, необходимого количества поверхностно-активного вещества (ПАВ) и базового масла.

Цель проведения испытаний – установление степени влияния добавки "Кластер-В" на ресурс сопряжения «поршневое кольцо – гильза цилиндра» дизеля КамАЗ -740.

Сравнительная оценка долговечности изучаемого сопряжения дизеля при использовании в эксплуатации базовой и экспериментальной смазочных композиций производилась с помощью методики прогнозирования остаточного ресурса по ГОСТ 21571-76 "Методы определения допускаемого параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов машин".

В качестве параметра технического состояния сопряжения "поршневое кольцо–гильза цилиндра" приняли величину зазора между поршневым кольцом и гильзой цилиндра ДВС. Поскольку получение информации о данном параметре путем прямого измерения зазора в сопряжении при эксплуатации двигателей связано с большими трудозатратами, использовали косвенный признак – величину расхода картерных газов.

Для повышения точности прогнозирования замеры параметров на каждом из дизелей производили дважды, через каждые 12000-15000 км пробега автомобиля КамАЗ. Снятие параметров совмещали с проведением соответствующего технического обслуживания.

По результатам испытаний установлено, что:

- условия эксплуатации двух групп автомобилей с экспериментальными дизелями КамАЗ-740 одинаковы и соответствуют техническим требованиям;
- сложных отказов и неисправностей при эксплуатации подконтрольных дизелей не наблюдалось;
- обработка полученных данных показала, что прогнозируемый остаточный ресурс сопряжения "поршневое кольцо–гильза цилиндра" дизелей КамАЗ-740, эксплуатировавшийся на масле Лукой 15W40 с присадкой "Кластер-В", увеличился в среднем на 68 %, по сравнению с ресурсом дизелей, работавших на чистом масле Лукой 15W40.
- испытания автомобилей с экспериментальными дизелями КамАЗ -740

на масле Лукой 15W40 с присадкой "Кластер-В" продолжаются.

Представители ООО

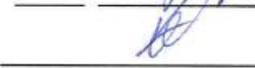
«Агрофирма «Рубеж»

 Банталов А.П.

" 20 " ноября 2020 г.

 Нагаев В.С.

" 20 " ноября 2020 г.

 Зайцев С.В.

" 20 " ноября 2020 г.

Представители ФГБОУ ВО

Саратовский ГАУ

 Сафонов В.В.

" 20 " ноября 2020 г.

 Буйлов В.Н.

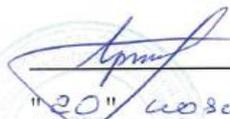
" 20 " ноября 2020 г.

 Сафонов К.В.

" 20 " ноября 2020 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «Агрофирма «Рубеж»


_____ Артемов П.А.
"20" ноября 2020 г.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ


_____ Воротников И.Л.
"20" ноября 2020 г.

А К Т

внедрения добавки "Кластер-В" к моторному маслу при эксплуатации
дизелей КамАЗ -740

Комиссия в составе представителей ООО «Агрофирма «Рубеж»: зам. генерального директора на производственном участке Банталова А.П., инженера по эксплуатации МТП Нагаева В.С., помощника механика Зайцева С.В. и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ: профессора, доктора технических наук Сафонова В.В., доцента кандидата технических наук Буйлова В.Н., ст. преподавателя Сафонова К.В. составила настоящий акт в том, что на основании положительных результатов эксплуатационных испытаний, проводившихся в ООО «Агрофирма «Рубеж», считать внедренным метод повышения долговечности дизелей КамАЗ-740 за счет использования добавки "Кластер-В" в базовое моторное масло

Разработанная эксплуатационно-восстановительная добавка к моторному маслу ("Кластер-В"), представляющая собой седиментационно-устойчивую суспензию смеси двух компонентов – ультра-наноразмерного порошка сплава латуни с серой и фосфором, ультра-наноразмерного порошка полититаната калия, необходимого количества поверхностно-активного вещества (ПАВ) и базового масла.

В процессе внедрения выполнен следующий объем работ:

1. В ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ приготовлена и передана ООО «Агрофирма «Рубеж» добавка "Кластер-В" в количестве 10 кг.

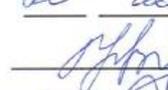
2. Проведены эксплуатационные испытания дизелей КамАЗ-740 на смазочной композиции, состоящей из моторного масла Лукой 15W40 и моторного масла Лукой 15W40 с добавкой "Кластер-В". Увеличение ресурса дизелей КамАЗ-740, испытываемых на масле с добавкой "Кластер-В", составило в среднем 68 %.

Представители ООО

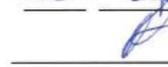
«Агрофирма «Рубеж»

 Банталов А.П.

"20" ноября 2020 г.

 Нагаев В.С.

"20" ноября 2020 г.

 Зайцев С.В.

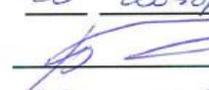
"20" ноября 2020 г.

Представители ФГБОУ ВО

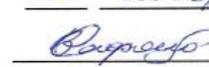
Саратовский ГАУ

 Сафонов В.В.

"20" ноября 2020 г.

 Буйлов В.Н.

"20" ноября 2020 г.

 Сафонов К.В.

"20" ноября 2020 г.

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального директора
ООО «Мировая техника»
И.Б. Самойленко
2022 г.



А К Т

ВНЕДРЕНИЯ ДОБАВКИ «КЛАСТЕР-В» В МОТОРНОЕ МАСЛО ДИЗЕЛЯ OM MB 926 LA ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОМБАЙНА CLAAS TUCANO 450

Комиссия в составе представителей ООО «Мировая техника»: руководителя отдела сервиса сельскохозяйственной техники Савенкова А.С., ведущего специалиста отдела гарантии Борисова А.А., специалиста отдела гарантии Дудкина Е.А. и представителей ФГБОУ ВО Вавиловский университет: профессора, доктора технических наук Сафонова В.В.; доцента, доктора технических наук Шишурина С.А.; доцента, кандидата технических наук Горбушина П.А., ассистента Сафонова К.В. составила настоящий акт о том, что на основании положительных результатов эксплуатационных испытаний комбайнов CLAAS TUCANO 450, укомплектованных дизелями OM MB 926 LA, проводившихся в ЗАО «Эльтон» Екатериновского района Саратовской области с июня по август 2022 года, считать внедренным метод повышения долговечности дизелей OM MB 926 LA за счет использования в моторном масле 10W-40 разработанной добавки «Кластер-В».

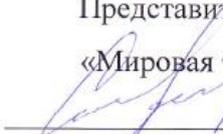
В процессе внедрения выполнен следующий объем работ:

1. Во ФГБОУ ВО Вавиловский университет приготовлена и передана ООО «Мировая техника» добавка «Кластер-В» в количестве 10 кг.
2. Проведены эксплуатационные испытания дизелей OM MB 926 LA на смазочной композиции, состоящей из базового моторного масла 10W-

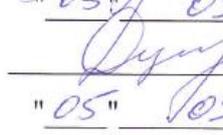
- 40 и добавки «Кластер-В». Прогнозируемое увеличение ресурса дизелей, испытываемых на масле с предлагаемой добавкой, составило 32%.
3. Расчетный экономический эффект от использования смазочной композиции состоящей из моторного масла 10W-40 и разработанной добавки «Кластер-В» составил более 450 тыс. руб. на один дизель OM MB 926 LA.

Представители ООО

«Мировая техника»:

 Савенков А.С.
 " 05 " 09 2022 г.

 Борисов А.А.
 " 05 " 09 2022 г.

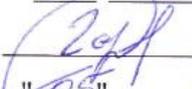
 Дудкин Е.А.
 " 05 " 09 2022 г.

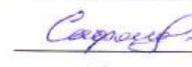
Представители ФГБОУ ВО

Вавиловский университет:

 Сафонов В.В.
 " 05 " 09 2022 г.

 Шишури́н С.А.
 " 05 " 09 2022 г.

 Горбушин П.А.
 " 05 " 09 2022 г.

 Сафоно́в К.В.
 " 05 " 09 2022 г.

УТВЕРЖДАЮ
 Генеральный директор АО «Декабрист»
 _____ Ребров А.А.
 " 3 " ноябрь 2023 г.

А К Т

проведения эксплуатационных испытаний добавки "Кластер-В" к моторному
 маслу двигателей КамАЗ -740

Комиссия в составе представителей АО «Декабрист»: главного инженера Ахатчикова П.А., начальника центральной ремонтной мастерской Голяхова В.С., бригадира Испулова Х.М. и представителей ФГБОУ ВО Вавиловский университет: профессора, доктора технических наук Сафонова В.В., доцента доктора технических наук Шишурина С.А., ст. преподавателя Сафонова К.В. составила настоящий акт в том, что с апреля 2023 г. по ноябрь 2023 г. в АО «Декабрист», Ершовского района Саратовской области были проведены эксплуатационные испытания четырех двигателей КамАЗ -7403.10, установленных на автомобилях КамАЗ 55-102. Из этого количества в 2 двигателя было залито базовое моторным маслом Лукойл 15W40, в другие 2 смазочная композиция, состоящая из смеси моторного масла Лукойл 15W40 и предлагаемой добавки "Кластер-В".

Разработанная эксплуатационно-восстановительная добавка к моторному маслу "Кластер-В", представляющая собой седиментационно-устойчивую суспензию смеси следующих компонентов – наноразмерного порошка сплава латуни с серой и фосфором, ультраразмерного порошка полититаната калия, необходимого количества поверхностно-активного вещества (ПАВ) и базового масла.

Цель проведения испытаний – установление степени влияния добавки "Кластер-В" на ресурс сопряжения «поршневое кольцо – гильза цилиндра» и двигателя КамАЗ -740 в целом.

Сравнительную оценку долговечности исследуемого сопряжения экспериментальных двигателей при использовании базового моторного масла и предлагаемой смазочной композиции производили с помощью методики прогнозирования остаточного ресурса по ГОСТ 21571-76 "Методы определения допускаемого параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса состав-

ных частей агрегатов машин".

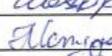
В качестве параметра технического состояния сопряжения "поршневое кольцо–гильза цилиндра" приняли величину зазора между поршневым кольцом и гильзой цилиндра ДВС. Поскольку получение информации о данном параметре путем прямого измерения зазора в сопряжении при эксплуатации двигателей связано с большими трудозатратами, использовали косвенный признак – величину компрессии в ЦПГ.

Для повышения точности прогнозирования ресурса экспериментальных двигателей, замеры контролируемого параметра, на каждом двигателе производили трижды, через каждые 16000 - 16500 км пробега автомобиля КамАЗ 55-102. Замеры величины компрессии в ЦПГ двигателей совмещали с проведением соответствующего их технического обслуживания.

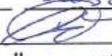
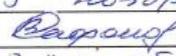
По результатам испытаний установлено, что:

- условия эксплуатации двух групп автомобилей с экспериментальными двигателями КамАЗ-740 были одинаковыми и соответствовали техническим требованиям;
- сложных отказов и неисправностей при эксплуатации подконтрольных двигателей не наблюдалось;
- обработка полученных данных показала, что прогнозируемый остаточный ресурс сопряжения "поршневое кольцо–гильза цилиндра" двигателей КамАЗ-740, работавших на масле Лукойл 15W40 с добавкой "Кластер-В", увеличился в среднем на 82 %, по сравнению с ресурсом двигателей, работавших на базовом масле Лукойл 15W40.
- испытания автомобилей с экспериментальными двигателями КамАЗ -740 на масле Лукойл 15W40 с добавкой "Кластер-В" продолжаются.

Представители АО
«Декабрист»

 Ахатчиков П.А.
" 3 " ноябрь 2023 г.
 Голяхов В.С.
" 3 " ноябрь 2023 г.
 Испулов Х.М.
" 3 " ноябрь 2023 г.

Представители ФГБОУ ВО
Вавиловский университет

 Сафонов В.В.
" 3 " ноябрь 2023 г.
 Шишурин С.А.
" 3 " ноябрь 2023 г.
 Сафонов К.В.
" 3 " ноябрь 2023 г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор АО «Декабрист»

Ребров А.А.

"Декабрист" № 07/2023 2023 г.

А К Т

внедрения добавки "Кластер-В" к моторному маслу при эксплуатации
автомобилей КамАЗ

Комиссия в составе представителей АО «Декабрист»: главного инженера Ахатчикова П.А., начальника центральной ремонтной мастерской Голяхова В.С., бригадира Испулова Х.М. и представителей ФГБОУ ВО Вавиловский университет: профессора, доктора технических наук Сафонова В.В., доцента доктора технических наук Шишурина С.А., ст. преподавателя Сафонова К.В. составила настоящий акт в том, что на основании положительных результатов эксплуатационных испытаний экспериментальных двигателей КамАЗ -7403.10, установленных на автомобилях КамАЗ 55-102, проводившихся в АО «Декабрист», Ершовского района Саратовской области, считать внедренным метод повышения долговечности двигателей КамАЗ-740 за счет использования добавки "Кластер-В" в базовое моторное масло Лукойл 15W40.

Разработанная эксплуатационно-восстановительная добавка "Кластер-В" к моторному маслу, представляющая собой седиментационно-устойчивую суспензию смеси следующих компонентов – наноразмерного порошка сплава латуни с серой и фосфором, ультраразмерного порошка полититаната калия, необходимого количества поверхностно-активного вещества (ПАВ) и базового масла.

В процессе внедрения выполнен следующий объем работ:

1. В ФГБОУ ВО Вавиловский университет приготовлена и передана АО «Декабрист» добавка "Кластер-В" в количестве 10 кг.
2. Проведены эксплуатационные испытания двигателей КамАЗ-7403.10 на смазочной композиции, состоящей из моторного масла Лукойл 15W40 и моторного масла Лукойл 15W40 с добавкой "Кластер-В".

Увеличение ресурса дизелей КамАЗ-7403.10, испытываемых на масле с добавкой "Кластер-В", составило в среднем 82 %.

3. Данный метод следует рекомендовать предприятиям занимающимся эксплуатацией автотракторной техники.

4. Расчетный экономический эффект от использования смазочной композиции состоящей из моторного масла Лукойл 15W40 с разработанной добавкой "Кластер-В" составил более 45 тыс. руб. на один двигатель КамАЗ-740.

Представители АО

«Декабрист»

 Ахатчиков П.А.

" 3 " ноября 2023 г.

 Голяхов В.С.

" 3 " ноября 2023 г.

 Испулов Х.М.

" 3 " ноября 2023 г.

Представители ФГБОУ ВО

Вавиловский университет

 Сафонов В.В.

" 3 " ноября 2023 г.

 Шишурин С.А.

" 3 " ноября 2023 г.

 Сафонов К.В.

" 3 " ноября 2023 г.



Министерство сельского хозяйства
Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ульяновский государственный
аграрный университет имени П.А.Столыпина»
(ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ)

Новый Венец бульвар, 1, Ульяновск, 432017,
Тел.: (8422)55-95-35, факс: (8422)55-23-75
e-mail: ugsha@yandex.ru; <http://www.ugsha.ru>
ОКПО 00493557; ОГРН 1027301181940;
ИНН/КПП 7303009510/732501001

"18 10 2013 г. № 01-05-02-24/1806
на № _____ от _____

Проректору по учебной работе
Саратовского университета генетики,
биотехнологии и инженерии им. Н.И. Вавилова
С.А. Макарову

СПРАВКА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина» сообщает, что на протяжении многих лет при проведении научно-исследовательских работ по разработке и исследованию эксплуатационных методов повышения надежности автотракторной техники были использованы разработки Саратовского университета генетики, биотехнологии и инженерии.

Особый интерес из них представляют присадки и добавки к смазочным материалам - приработочные, эксплуатационные и эксплуатационно-восстановительные на основе ультра и наноразмерных порошкообразных материалов, полученные методами плазменной переконденсации и химическим синтезом (авторы: Сафонов В.В., Венскаяйтис В.В., Азаров А.С., Шишурин С.А., Сафонов К.В.).

Для приготовления смазочных композиций использовали разные сорта минеральных, синтетических и трансмиссионных масел, а также пластичные смазки.

На основе полученных ультра и наноразмерных порошкообразных материалов разработана целая гамма смазочных композиций серии "Кластер" предназначенных для снижения коэффициента трения, износа, повышения нагрузки схватывания трущихся деталей, что при их использовании приводит к повышению долговечности ресурсопределяющих агрегатов автотракторной техники.

Опубликованные за последние 10 лет научные труды с участием Сафонова Константина Валентиновича с приведенными в них рекомендациями по применению, составам эксплуатационно-восстановительных добавок к смазочным материалам и результатам их применения используются в учебном процессе кафедрами «Технология производства и ремонта машин» и «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования» при изучении дисциплин: «Эксплуатационные материалы и экономия топливно-энергетических ресурсов»; «Перспективные технологии технического обслуживания и хранения транспортных и транспортно-технологических машин»; «Трибологические основы повышения ресурса машин»; «Основы триботехники»; «Технология ремонта машин»; «Эксплуатационные материалы»; «Перспективные технологии технического обслуживания наземных транспортно-технологических средств»; «Топливо и смазочные материалы»; «Повышение эффективности использования техники в сельскохозяйственном производстве»; «Исследование качества топливо-смазочных материалов и применение альтернативных видов топлива».

Проректор
по учебной, воспитательной работе
и молодежной политике



М.П.

тсвб /М.В. Постнова

000815

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В.Я. ГОРИНА»
(ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ)**

308503, пос. Майский Белгородского района Белгородской области, ул. Вавилова, 1.
ОКПО 04717947; ОГРН 1023100508078; ИНН/КПП 3102005412/310201001
Тел.: (4722) 39-21-79, Fax.: (4722) 39-22-62, E-mail: info@bsaa.edu.ru

№ 1972 от «до» 10 2023 г.

Проректору по учебной работе
ФГБОУ ВО Саратовский университет
генетики, биотехнологии и инженерии
им. Н.И. Вавилова

С.А. Макарову

СПРАВКА

Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина сообщает, что в 2010-2023 гг. при проведении научно-исследовательских работ по разработке и исследованию присадок и добавок к смазочным материалам автотракторной техники были использованы разработанные в Саратовском университете генетики, биотехнологии и инженерии приработочные, эксплуатационные и эксплуатационно-восстановительные добавки на основе ультра- и наноразмерных порошкообразных материалов полученных методами плазменной переконденсации и химическим синтезом (авторы: Сафонов В.В., Венскаяйтис В.В., Азаров А.С., Шишурин С.А., Сафонов К.В.).

Применение разработанных составов порошкообразных добавок позволяет по бензиновым и дизельным двигателям: повысить компрессию в цилиндропоршневой группе; уменьшить расход картерных газов; увеличить давление в системе смазки; уменьшить токсичность и дымность выхлопных газов и в итоге увеличить ресурс двигателей.

Опубликованные научные труды Сафоновым К.В., приведенные в них рекомендации по применению, составы эксплуатационно-восстановительных добавок к смазочным материалам и их результаты исследований используются в учебном процессе кафедрой технического сервиса в АПК при изучении дисциплин «Топливо и смазочные материалы», «Основы трибологии», «Надежность и ремонт машин», «Надежность технических систем», «Нанотехнологии и наноматериалы в агроинженерии».

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ



Н.И. Клостер

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО Вавиловский университет

С.А. Макаров



СПРАВКА

В Саратовском университете генетики, биотехнологии и инженерии им. Н.И. Вавилова на протяжении многих лет группа преподавателей кафедры «Техническое обеспечение АПК» занимаются разработкой, исследованиями и внедрением присадок и добавок к смазочным материалам автотракторной техники.

Особый интерес представляют присадки и добавки к смазочным материалам на основе ультра- и наноразмерных порошкообразных материалов. Порошкообразные компоненты получены методами плазменной переконденсации и химического синтеза.

Предлагаемые смазочные композиции применяют в период обкатки, установившейся эксплуатации и в период, приближенный к предельному состоянию агрегатов автотракторной техники.

Для приготовления смазочных композиций использовали разные сорта минеральных, синтетических и трансмиссионных масел, а также пластичные смазки.

На основе полученных ультра- и наноразмерных порошкообразных материалов разработана целая гамма смазочных композиций серии «Кластер» (приработочные, эксплуатационные и эксплуатационно-восстановительные), предназначенных для снижения коэффициента трения, износа, повышения нагрузки схватывания трущихся деталей. Применение разработанных добавок в процессе стендовой обкатки и эксплуатации автотракторной техники способствует повышению ее долговечности (авторы: Сафонов В.В., Венскайтис В.В., Азаров А.С., Шишурин С.А., Сафонов К.В.).

Научные труды, опубликованные за последние 10 лет с участием Сафонова К.В., с приведенными в них рекомендациями по применению, составам эксплуатационно-восстановительных добавок к моторным маслам и результатами их применения, используются в учебном процессе на кафедре «Техническое обеспечение АПК» при изучении дисциплин «Эксплуатационные материалы», «Триботехника» и «Технология ремонта тракторов и автомобилей».

Декан факультета инженерии
и природообустройства
ФГБОУ ВО Вавиловский университет,
и.о. заведующего кафедрой
«Техническое обеспечение АПК»

Шишурин С.А.



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО**

**ВСЕРОССИЙСКАЯ МОЛОДЕЖНАЯ ВЫСТАВКА-КОНКУРС
ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ИЗОБРЕТЕНИЙ И ИННОВАЦИЙ**

ДИПЛОМ

II степени

НАГРАЖДАЕТСЯ

Проект
**Высокоэффективные наноконпонентные
смазочные материалы**

Авторы: Сафонов В.В., Александров В.А.,
Азаров А.С., Сафонов К.В.

Саратовский государственный аграрный университет
им. Н. И. Вавилова

Руководитель
организационного комитета,
ректор Саратовского
государственного университета
профессор
Л. Ю. Коссович



*Саратов,
27-28 октября 2009 г.*





Сертификат

участника

Сафонов Константин Валентинович

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова»



Генеральный директор
ОАО «ГАО ВВЦ»

А.Е. Микушко

Москва, ВВЦ, 25 – 28 июня 2013 г.



салон

VII САРАТОВСКИЙ
САЛОН ИЗОБРЕТЕНИЙ,
ИННОВАЦИЙ И ИНВЕСТИЦИЙ

ДИПЛОМ
I степени
Золотая медаль

Присуждается за проект

Нанотехнологические методы
ресурсосбережения технических объектов

Авторы проекта

Сафонов В.В., Добринский Э.К., Гороховский А.В.,
Шишурин С.А., Азаров А.С., Палагин А.И., Хорюков С.И.,
Третьяченко Е.В., Аристов Д.В., Сафонов К.В.,
Сёмочкин В.С.

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный
университет имени Н.И.Вавилова»

Министр
промышленности и энергетики
Саратовской области
С.М. ЛИСОВСКИЙ

Ректор
Национального исследовательского
Саратовского государственного
университета им. Н.Г.Чернышевского
Л.Ю. КОССОВИЧ