ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ОРЕХОВ Виталий Владимирович

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ АВТОБУСОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, профессор
Назаркин Виктор Гаврилович

Санкт-Петербург – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ АВТОБУСОВ 14

1.1 Актуальность проблемы эксплуатационной надежности ГМКП 14

1.2 Анализ эксплуатационной надежности ГМКП в городской среде 23

1.3 Анализ применяемых смазочных материалов при эксплуатации 38

1.4 Разработка классификатора и схемы факторов отказов ГМКП 46

Выводы по главе 49

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ТРИБОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ СРЕДА – АГРЕГАТ – СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ 50

2.1 Теоретическая классификация информации о работоспособности системы «среда – агрегат – смазочный материал» 51

2.2 Теоретические вопросы исследования процессов изнашивания и образования твердых осадков в системе «среда – агрегат – смазочный материал» 55

2.3 Закономерности процессов изнашивания трущихся сопряжений при эксплуатации гидромеханических коробок передач 58

2.4 Закономерности изменения параметров работающего смазочного материала при эксплуатации агрегатов и их связь с работоспособностью системы «агрегат – смазочный материал» 65

Выводы по главе 76

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА И ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА 77

3.1 Особенности условий подконтрольной эксплуатации автобусов входе исследований 77

3.2 Исследования физико-химических параметров смазочных материалов при эксплуатации ГМКП 87

3.3 Исследования параметров триботехнической системы «металлокерамическая поверхность – смазочный материал – стальная поверхность» наименее надежного узла ГМКП при эксплуатации 105
3.4 Математические модели изменения параметров триботехнической системы «металлокерамическая поверхность – смазочный материал – стальная поверхность» при эксплуатации ГМКП 120
Выводы по главе 134
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОРОБКАХ ПЕРЕДАЧ АВТОБУСОВ 136
4.1 Усовершенствование метода обоснования периодичности технического обслуживания агрегата 136
4.2 Оценка ресурса агрегата при применении усовершенствованного метода 144
4.3 Метод повышения долговечности и направления его применения 152
4.4 Подконтрольные эксплуатационные испытания агрегата при применении разработанного метода 157
4.5 Технико-экономическая эффективность внедрения метода 157
Выводы по главе 164
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 166
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 168
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 169
ПРИЛОЖЕНИЯ 187
ПРИЛОЖЕНИЕ А Документы, подтверждающие практическую значимость исследования 188
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Вид цифрового документа «Заказ на ремонт» 193
ПРИЛОЖЕНИЕ В Фрагмент статистики отказов ГМКП по подвижному составу ГУП ПАТ 194
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Матрица взаимосвязи признаков и причин отказов ГМКП 195

ПРИЛОЖЕНИЕ Д Методы испытаний и характеристики ФХ параметров СМ ГМКП 199
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Фрагменты спецификаций СМ для ГМКП 203
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Лабораторный отчет и акт отбора применяемых СМ 207
ПРИЛОЖЕНИЕ И Группы основных базовых СМ 209
ПРИЛОЖЕНИЕ К Анализ дефектов – механических причин полных отказов ГМКП городского автобуса 210
ПРИЛОЖЕНИЕ Л Зависимость износа элемента трибосопряжения от продолжительности эксплуатации 220
ПРИЛОЖЕНИЕ М Корреляционная матрица взаимосвязи макро- и микроуровневых ФХ параметров СМ 221
ПРИЛОЖЕНИЕ Н Схема функционирования триботехнической системы «среда – агрегат – СМ» 222
ПРИЛОЖЕНИЕ П Методика проведения эксплуатационных испытаний 223
ПРИЛОЖЕНИЕ Р Перечень используемого оборудования для исследования ФХ параметров СМ 238
ПРИЛОЖЕНИЕ С Лабораторные отчеты исследований проб СМ по итогам эксплуатационных испытаний ГМКП автобусов 240
ПРИЛОЖЕНИЕ Т Внешнее изменение СМ в процессе испытаний 249
ПРИЛОЖЕНИЕ У Матрица планирования и результаты ПФЭ триботехнических исследований 250
ПРИЛОЖЕНИЕ Ф Результаты расчетных оценочных показателей ПФЭ 252
ПРИЛОЖЕНИЕ Х Результаты регрессионного анализа изменения коэффициента трения 254
ПРИЛОЖЕНИЕ Ц Результаты регрессионного анализа изменения интенсивности изнашивания 259
ПРИЛОЖЕНИЕ Ш Программный кодовый модуль численного прогнозирования ресурса муфты сцепления 264
ПРИЛОЖЕНИЕ Э Численная модель прогнозирования ресурса ГМКП .. 265

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Основной объём пассажирских перевозок в стране обеспечивается именно автобусным транспортом, который, в отличие от троллейбусов, трамваев и метро, присутствует во всех населённых пунктах без исключения, поэтому вопросы эффективности его эксплуатации требуют приоритетного внимания. Эксплуатационная эффективность автотранспортных средств (АТС) определяется, главным образом, уровнем комплексного свойства – надежностью ключевых агрегатов и конструкционных элементов: кузова, двигателя, трансмиссии, тормозной системы, подвески, электрооборудования и других систем.

Исследования показывают, что наряду с другими критически важными элементами конструкции городских автобусов существенный риск отказов приходится на трансмиссию. Последствием таких отказов является остановка АТС и нарушение регулярности перевозок. В первую очередь такие отказы относятся к коробке переключения передач – одному из ключевых узлов трансмиссии. Современные модели городских автобусов, эксплуатирующихся в крупных городах РФ, оснащаются преимущественно гидравлическими автоматическими коробками передач (гидромеханической трансмиссией). Этот вид трансмиссии преобладает практически повсеместно (около 90 % парка страны).

Анализ опыта эксплуатации городского автобусного транспорта крупнейшим пассажирским перевозчиком Северо-Западного региона России – СПб ГУП «Пассажиравтотранс», а также ряда научных работ таких исследователей, как В.А. Аметов, В.И. Кудинов, С.А. Ляпин, Ю.А. Власов, В.А. Коваленко, М.А. Григорьев и др. доказывает, что соблюдение требований систем технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) согласно рекомендациям заводов-изготовителей автобусов или их агрегатов не всегда обеспечивает достижение декларируемого ресурса, что является одним из проявлений недостаточной долговечности. На практике фактический ресурс

гидромеханических коробок передач оказывается существенно ниже заявленного, что приводит к увеличению простоев автобусов в ремонте.

Ключевыми методами повышения долговечности агрегатов АТС являются конструкторско-технологические (модернизация узлов систем смазки, фильтрации, внедрение новых конструкционных материалов) и химико-трибологические (модификация смазочных материалов присадками, разработка новых рецептур базовых масел и реагентов). Реализация данных подходов связана с осуществлением трудоёмких и рискованных конструкционных и технологических операций, которые трудно реализуемы непосредственно в процессе технической эксплуатации АТС.

Таким образом, актуальным направлением научного исследования в сфере технической эксплуатации АТС является повышение долговечности гидромеханических коробок передач (ГМКП) городских автобусов путём разработки эксплуатационного метода, а именно совершенствования системы ТО и Р на основе зависимостей физико-химических параметров смазочного материала (СМ) и параметров триботехнических систем узлов агрегата от наработки, что позволяет увеличить ресурс агрегата без вмешательства в его конструкцию и изменения технологии изготовления.

Степень разработанности исследования. Совершенствованию эксплуатационной надежности АТС посвящены труды: Аметова В.А., Аринина И.Н., Веревкина Н.И., Власова Ю.А., Воронцова И.И., Гордиенко В.Е., Григорьева М.А., Гришкевича А.И., Грушецкого С.М., Давыдова Н.А., Дзядыка М.Н., Добромирова В.Н., Евтюкова С.А., Захарова Н.С., Индикта Е.А., Картошкина А.П., Калявина В.П., Котикова Ю.Г., Коваленко В.А., Корчажкина М.Г., Кривенко Е.И., Кудинова В.И., Кузнецова Е.С., Кузьмина В.С., Кустикова А.Д., Ляпина С.А., Максимова С.Е., Назаркина В.Г., Острейковского В.А., Панькова Н.П., Пронина Б.А., Пушкарева А.Е., Репина С.В., Савича Е.Л., Севрюгиной Н.С., Селезнева М.В., Туркеева Г.Г., Черняева И.О., Шейнина А.М., а также Bertsche B. (Германия), Dhillon B.S. (Канада), Klenke S. (Германия), Kuchle A. (Германия), Muller J. (Германия), Naunheimer

H. (Германия), Novak W. (Германия), Ryborz J. (Германия), Schmidt M. (Германия), Weber T. (Германия / США) и др. Наиболее близкими к теме исследования являются работы, в которых рассматриваются вопросы диагностирования, определения и корректировки периодичности технического обслуживания и оценки долговечности агрегатов трансмиссии АТС с учётом свойств СМ: Аметова В.А., Власова Ю.А., Гордивского В.Н., Гумелёва В.Ю., Череватенко В.В., Григорьева М.А., Коваленко В.А., Кудинова В.И., Кустикова А.Д., Ляпина С.А., Маньшева Д.А., Пильщикова В.Л., Селезнева М.В., Хазиева А.А., а также зарубежных исследователей Bosman R. (Нидерланды), Bertsche B., Kuchle A., Naunheimer H., Novak W., Ryborz J., Schipper D. J. (Нидерланды).

В работах перечисленных авторов отмечено, что большинство предлагаемых решений являются конструкторско-технологическими, химико-трибологическими либо эксплуатационными методами. Первые требуют существенной доработки конструкции агрегата, вторые не всегда реализуемы в условиях текущей эксплуатации, а эффективность эксплуатационных методов снижена из-за их фрагментарности. Кроме того, они не учитывают взаимосвязь зависимостей триботехнических и физико-химических параметров применяемых СМ от наработки.

Существующие подходы не решают поставленную задачу для гидромеханической трансмиссии городских автобусов, работающих в режиме частых стартов, разгонов и остановок. Поэтому данное исследование приобретает особую значимость

Цель исследования повышение долговечности гидромеханических коробок передач автобусов путем совершенствования системы технического обслуживания на основе закономерностей изменения параметров триботехнической системы и эксплуатационных свойств применяемых смазочных материалов от наработки.

Задачи исследования:

1. Проанализировать мероприятия по поддержанию регламентированного уровня эксплуатационной надежности ГМКП автобусов на основе статистических данных об отказах и оценки свойств, применяемых СМ.

2. Установить зависимости от наработки в процессе эксплуатации гидромеханических коробок передач: физико-химических параметров СМ; параметров концентраций химических элементов, входящих в состав СМ (накапливаемых и расходуемых); параметров триботехнической системы «металлокерамическая поверхность – СМ – стальная поверхность», лимитирующей ресурс агрегата.

3. Усовершенствовать метод обоснования периодичности технического обслуживания гидромеханических коробок передач на основе учета предельно допустимых значений физико-химических (диагностических) параметров СМ перед началом аварийного периода эксплуатации агрегата.

4. Разработать метод повышения долговечности гидромеханических коробок передач при эксплуатации, подтвердив его техническую эффективность путём построения модели прогнозирования износа фрикционного материала дисков муфты сцепления и модели оценки ресурса агрегата.

5. Определить направления практической реализации метода повышения долговечности гидромеханических коробок передач автобусов и оценить технико-экономический эффект его применения.

Объект исследования – гидромеханические коробки передач городских автобусов.

Предмет исследования – закономерности изменения технического состояния гидромеханических коробок передач городских автобусов в условиях интенсивного городского трафика, с учётом изменений параметров элементов триботехнической системы.

Границы исследования – в работе исследуются вопросы долговечности и технического состояния гидромеханических коробках передач городских автобусов.

Научная новизна исследования:

1. Установлены зависимости от наработки в процессе эксплуатации ГМКП: физико-химических параметров СМ (кинематическая вязкость при 40 и 100 °С, кислотное число, плотность, температуры вспышки и застывания); параметров концентраций химических элементов, входящих в состав СМ (накапливаемых и расходуемых); параметров триботехнической системы «металлокерамическая поверхность – СМ – стальная поверхность» (коэффициент трения, интенсивность изнашивания), лимитирующей ресурс агрегата.

2. Усовершенствован метод обоснования периодичности технического обслуживания ГМКП путем учета предельно допустимых значений диагностически значимых физико-химических параметров СМ, соответствующих аварийному периоду эксплуатации агрегата.

3. Построена математическая модель для прогнозирования износа слоя фрикционного материала дисков муфты сцепления, численная модель оценки ресурса ГМКП с учетом периодичности технического обслуживания.

Теоретическая значимость исследования заключается в расширении представлений об изменении свойств СМ, используемых в ГМКП городских автобусов в процессе эксплуатации, а именно в установленных зависимостях изменения концентраций химических элементов, физико-химических параметров (кинематической вязкости, плотности, кислотного числа) и параметров триботехнических систем (коэффициента трения и интенсивности изнашивания) от наработки в процессе циркуляции этих материалов в агрегате.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения усовершенствованного метода и разработанных положений, повышающих долговечность, организациями, эксплуатирующими городской

автобусный транспорт, и производителями агрегатов для совершенствования нормирования долговечности гидромеханических трансмиссий и обоснования периодичности их технического обслуживания. Результаты исследования могут быть внедрены в учебные программы вузов, осуществляющих подготовку инженерных кадров для транспортной отрасли.

Методология и методы исследования основываются на применении системного анализа и методов классической статистики, фундаментальных положениях трибологии и химмотологии в приложении к технической эксплуатации автотранспортных средств, а также подходах математического моделирования и планирования полнофакторного эксперимента. Обработка массивов экспериментальных и эксплуатационных данных организована с использованием программного обеспечения, средств математической статистики и аналитических способов решения многокритериальных задач.

Положения, выносимые на защиту:

1. Установленные зависимости от наработки в процессе эксплуатации ГМКП: физико-химических параметров СМ; параметров концентраций химических элементов, входящих в состав СМ; триботехнических параметров системы «металлокерамическая поверхность – СМ – стальная поверхность», лимитирующей ресурс агрегата.

2. Усовершенствованный метод обоснования периодичности технического обслуживания ГМКП, основанный на учете предельно допустимых значений физико-химических (диагностических) параметров СМ, предшествующих аварийному периоду эксплуатации агрегата.

3. Модели прогнозирования износа слоя фрикционного материала дисков муфты сцепления и оценки ресурса ГМКП с учетом периодичности технического обслуживания, позволяющие обосновать долговечность.

4. Метод повышения долговечности ГМКП автобусов, основанный на установленных закономерностях изменения параметров триботехнической системы и эксплуатационных свойств применяемых СМ от наработки и

реализуемый через рационализацию периодичности технического обслуживания.

Рабочая гипотеза заключается в том, что долговечность ГМКП может быть повышена за счет назначения научно обоснованной периодичности технического обслуживания, определяемой по установленным закономерностям изменения параметров триботехнической системы и эксплуатационных свойств СМ, что позволяет упредить переход эксплуатации агрегата в стадию аварийного износа.

Методология проверки рабочей гипотезы. Подтверждение рабочей гипотезы требует комплексного изучения взаимодействий в системе «среда – агрегат – СМ». Предлагается проведение экспериментальных исследований в процессе подконтрольной эксплуатации в реальных дорожных условиях городского транспорта для мониторинга изменения физико-химических и триботехнических параметров в течение регламентированной заводом-изготовителем периодичности технического обслуживания (ТО). Полученные данные позволят оценить влияние изменений параметров на ресурс агрегата и сформировать обоснованные научно-технические рекомендации о рациональной периодичности ТО для повышения долговечности ГМКП автобусов.

Область исследования соответствует пунктам 11 и 12 паспорта научной специальности 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта.

Степень достоверности проведенных исследований обоснована применением признанного аппарата и фундаментальных положений трибологии и химмотологии в технической эксплуатации автотранспортных средств, а именно математических моделей процесса трения фрикционных дисков муфт сцепления исследуемого агрегата, методов оценки физико-химических свойств эксплуатационных материалов; обеспечена публикациями в рецензируемых изданиях ВАК РФ и сходимостью теоретических и экспериментальных данных, их согласованностью с апробированными результатами других авторов.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

– на основании выполненного анализа была сформулирована задача обеспечения долговечности ГМКП при эксплуатации городских автобусов в условиях интенсивного трафика, работающих в режиме частых стартов, разгонов и остановок, за счёт упреждения перехода нормального износа агрегата в аварийную стадию;

– проведены теоретические и экспериментальные исследования параметров, характеризующих долговечность ГМКП в городской среде;

– установлены зависимости, положенные в основу усовершенствованного метода обоснования периодичности технического обслуживания ГМКП, направленного на повышение долговечности агрегата в процессе эксплуатации, а также на оценку технико-экономического эффекта применения полученных результатов исследования.

Апробация работы. Результаты диссертации доложены и обсуждены на международных конференциях: Международной научно-практической конференции «Архитектура – Строительство – Транспорт – Экономика», Санкт-Петербург, 77-й (22–23.11.2023 г.); 79-й (20-21.11.2025 г.); 9-й Международной научно-практической конференции «Перспективы развития транспортного комплекса», Республика Беларусь, Минск, 12–14.10.2024 г.; 26-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы эксплуатации авто-транспортных средств», Владимир, 21 – 22.11.2024 г.; 83-й Международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 28-30.01.2025 г.

Реализация результатов диссертации. Результаты диссертации подтверждаются актами о внедрении: метод определения периодичности ТО (замена СМ и фильтрующих элементов) агрегатов трансмиссии городских автобусов внедрен в производственную деятельность СПб ГУП «Пассажиравтотранс»; результаты диссертационного исследования внедрены

в техническую стратегию развития ООО «ДОМТРАНСАВТО» (г. Санкт-Петербург); и актом внедрения в образовательный процесс: материалы диссертационного исследования внедрены в содержание учебного процесса ФГБОУ ВО «СПбГАСУ» на кафедре технической эксплуатации транспортных средств по направлениям подготовки бакалавриата 23.03.03 и магистратуры 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ общим объёмом 6,65 печатного листа, из которых 5 статей – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена общим объёмом 186 страниц машинописного текста, содержит 61 рисунок и 19 таблиц. Структура работы: введение, четыре главы, заключение, список литературы из 155 наименований и приложения на 79 страницах.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ АВТОБУСОВ

1.1 Актуальность проблемы эксплуатационной надежности ГМКП

Проблемы повышения эксплуатационной надёжности, экономичности, экологичности, а также снижения материалоёмкости и энергопотребления автобусов являются особенно актуальными в современных городских мегаполисах. Данные проблемы стоят перед экономическим и технологическим развитием транспортной индустрии.

Особое значение в исследованиях данных задач имеет качество используемых эксплуатационных жидкостей или смазочных материалов (топливо, СМ моторные и трансмиссионные, охлаждающие жидкости, пластинчатые смазки и т.д.), а также их рациональная эксплуатация.

Установленные сроки замены смазочных материалов (СМ) оказывают непосредственное воздействие на эксплуатационную надёжность агрегатов трансмиссии городских автобусов, следовательно, и на себестоимость выполняемых транспортно-технологических процессов.

СМ в ГМКП является особенно важным рабочим элементом, обеспечивающим надёжное функционирование систем данного агрегата трансмиссии. Ввиду того, что в механических коробках передач (МКП) СМ необходимо в первую очередь для смазки подшипников скольжения и качения, зубьев шестерен, синхронизаторов, валов управления, торцевых шайб и т.д. В то время как в ГМКП СМ помимо функции смазки и отведения тепла, выполняет функции включения/переключения передач, охлаждения (оказывая воздействие на тепловой режим работы, воспринимая и передавая тепловую энергию), передачи крутящего момента от двигателя на другие элементы трансмиссии автобуса. Следовательно, СМ, применяемые в ГМКП, является рабочими жидкостями [1].

Таким образом, можно утверждать, что данная рабочая жидкость эксплуатируется в исключительно жестких условиях, а значит в процессе эксплуатации она должна сохранять основные свои свойства (например, такие как кинематическая вязкость, текучесть и несжимаемость в заданных значениях), которые в прямой зависимости влияют на надёжность ГМКП и всего транспортного средства в процессе эксплуатации.

Исследованию рабочих процессов и конструкций ГМКП посвящены труды авторов: В.В. Баранов, В.П. Волков, Н.Я. Говорущенко, М.Н. Дзядык, Ю.Б. Красников, Г.В. Крамаренко, А.Н. Князьков, В.А. Лов, Н.Д. Мазлов, А.Н. Мельников, В.И. Погорелов, А.Н. Тарасик, А.П. Уланов, А.С. Ушенин, Ю.И. Чередниченок, А.И. Гришкевич, B. Bertsche (Германия), A. Kuchle (Германия), H. Naunheimer (Германия), W. Novak (Германия), J. Ryborz (Германия) и др.

В соответствии с технической документацией современных ГМКП автобусов диапазон рабочей температуры СМ в картере ГМКП (80-110°С), а в летнее время года температура может достигнуть максимального предела (120-140°С), что отрицательно влияет на протекающие рабочие процессы ГМКП. Так как с увеличением рабочей температуры изменяются основные физико-химические (ФХ) показатели СМ, в первую очередь ключевые показатели вязкости, тем самым многократно возрастает риск питтинговых перегревов деталей ГМКП. И как следствие снижается поверхностная твердость зубьев шестерен, тел качения (подшипников, валов) и гидроцилиндрических поршней фрикционных муфт, что приводит к разрушающим последствиям или критическому снижению надёжности.

Следует отметить, при превышении рабочей температуры СМ выше максимально допустимой (120-130°С), в противоизносных и противозадирных присадках на макромолекулярном уровне в химических элементах происходит термоокислительная деструкция (разрушение макромолекул), введу совместного воздействия повышенной температуры и кислорода.

В процессе эксплуатации ГМКП на различных нагрузочных режимах возникают следующие каталитические факторы: окисление,

термоокислительная деструкция присадок, каталитическое воздействие конструкционных материалов, гидродинамическая, гидромеханическая, механическая и химическая деструкция, барботирование, а также образование и разрушение водно-масляной эмульсии [2].

Перечисленные факторы влияют на срок службы СМ, так как они способствуют безвозвратному изменению комплекса заложенных свойств, структуры и состава и истощению комплекса рецептурных химических элементов. Ухудшаются структурные, физико-химические, триботехнические и эксплуатационные свойства СМ (моющие, диспергирующие, противопенные, антиокислительные, антикоррозионные, смазочные) теряя исходные значения показателей – технологически заложенное в рецептуре.

Существенный вклад в исследование свойств смазочных материалов, применяемых в АТС, внесли труды отечественных и зарубежных учёных, таких как: Г.А. Акопян, С.Г. Арабян, В.Б. Абрамович, В.А. Аметов, В.Д. Бари, Р. Балтенас, Ю.А. Власов, Д. Винеке, А.В. Виленкин, В.А. Войтов, В.В. Гришин, М.А. Григорьев, В.Б. Джерихов, П.П. Заскалько, Н.В. Зименко, А.Н. Иванкин, В.И. Кудинов, Н.А. Кузьмин, Л.А. Киселев, К.И. Климов, Г.И. Кичкин, В.А. Коваленко, А.Д. Кустиков, С.А. Ляпин, А.В. Левченко, Л.Ф. Мильченко, С.А. Митиков, Д.А. Маньшев, В.И. Некрасов, Л.Р. Рудник, А.С. Сафонов, В.С. Седачева, М.В. Селезнев, В.А. Солдатов, М.И. Суханов, А.С. Терехов, А.И. Ушаков, В. Шергалис, J. Johansson (Швеция), W.J. Bartz (Польша), D. Wienecke (Германия), A.J. Caines (США, Великобритания), R.H. Haycock (США), J.G. Wills (США) и др.

Эксплуатационные – смазочные свойства СМ заключаются в минимизации трения и изнашивания всех видов, которые, в свою очередь, характеризуются противоизносными, противозадирными, противопиттинговыми, (антифрикционными) и антиокислительными свойствами [3, 4, 5, 6].

Также ухудшение свойств увеличивает суммарные потери энергии на трение внутренних конструктивных элементов – вязкостные потери. При

трогании транспортного средства с ГМКП с места и в процессе переключения передач могут возникать рывки, так как в процессе наработки происходят изменения вязкостных показателей, относительно СМ с нулевой наработкой, в результате фрикционная муфта включается с пробуксовкой вызывая динамические удары. Следовательно, такое СМ уже не соответствует установленной классификации СМ, применяемых при эксплуатации конкретной ГМКП.

Основные показатели ФХ свойств характеризуют состояние применяемого СМ, изменение их значений от номинальных в процессе эксплуатации, свидетельствует об ухудшении эксплуатационных его свойств. Так, например, параметр кинематической вязкости интегрально учитывает все требуемые свойства, а значит он может являться одним из основных критериев характеризующим эффективность смазочных свойств СМ.

Основные ФХ параметры СМ, применяемых в ГМКП представлены в таблице 1.1 [1, 2, 3].

Таблица 1.1 – Основные ФХ параметры СМ, применяемых в ГМКП

Параметры	Единицы измерения
Кинематическая вязкость при 40°С/100°С	$мм^2/с$
Индекс вязкости	-
Плотность при, 15˚С	$кг/м^3$
Температура вспышки в открытом тигле	°С
Температура застывания	°С
Общее кислотное число	мгКОН/г
Содержание воды	%
Массовая доля механических примесей (Содержание твердого осадка)	%масс
Массовая доля содержания серы	%масс
Коррозия медной пластинки	балл

Для мониторинга состояния смазочных материалов применен спектральный анализ (детальная оценка состава присадок и накоплений частиц загрязнений и износа трибосопряжений) и инфракрасная спектроскопия (визуализация комплексного изменения состава по сравнению спектров) [1, 2, 3].

Считается, что при достижении предельного допустимого значения хотя бы одного ФХ параметра, СМ должно быть заменено на новое [3].

Обеспечение требуемого качества СМ на всем ресурсном периоде, возможно только при точном его соответствии необходимым свойствам разработанной конструкции ГМКП и соблюдении всех её режимов и условий эксплуатации.

Однако, в последние годы, опираясь на современную технологию и рецептуру СМ для ГМКП автобусов, а также по экономическим и экологическим фактам, среди производителей данных СМ появилась тенденция увеличения интервалов их замены, как следствие производители ГМКП для автобусов увеличили периодичность замены СМ. Данное решение, можно интерпретировать следующим образом. Если применять при эксплуатации СМ из рекомендуемой классификации, то показатели надёжности данного агрегата не изменятся.

На сегодняшний день, периодичность замены СМ в зависимости от марки и модели ГМКП автобуса, для эксплуатации в условиях мегаполиса, составляет 60 – 240 тыс.км. Однако, следует отметить, что большая масса автобусов за последнее десятилетие оснащалась ГМКП с межсервисным интервалом 180-240 тыс.км.

Увеличенная периодичность ТО, установленная заводом-изготовителем, обоснована для условий со стабильным климатом, низкой запыленностью и отсутствием интенсивного трафика. Однако практика реальной эксплуатации городских автобусов в условиях мегаполиса с регламентированной периодичностью приводит к форсированному износу и преждевременным капитальным ремонтам ГМКП. Замена СМ раньше установленного срока экономически нерациональна из-за роста эксплуатационных издержек. Поэтому для повышения эксплуатационной надежности и экономической эффективности необходимо контролировать фактическое состояние масла в реальных условиях эксплуатации.

Методы оценки показателей состояния СМ необходимы для анализа и совершенствования подходов определения рациональных сроков их замены на практике. Однако постоянный контроль качества технических жидкостей требует значительных финансовых затрат на оборудование и расходные материалы, что доступно не каждому автотранспортному предприятию (АТП) из-за высокой нагрузки на производственно-хозяйственную деятельность и отсутствия явной экономической целесообразности. Следует отметить, что разовые испытания физико-химических параметров не дают комплексного эффекта для совокупности однотипных технических объектов. Поэтому для повышения их долговечности и эффективности работы необходимо проводить мониторинг и испытания в процессе всего цикла эксплуатации – от нулевой наработки до полного отказа агрегата – в реальных условиях.

Только такой комплексный подход к сбору и оценке показателей качества технических жидкостей позволяет обеспечить высокую степень прогнозируемости изменения работоспособного состояния технических объектов и повысить их долговечность в процессе эксплуатации. Для этого необходимо провести отбор проб СМ на различных этапах наработки ГМКП с целью выявления закономерностей изменения их параметров.

Перед проведением указанных исследований необходимо выбрать модель ГМКП. С этой целью следует выполнить оценку фактической долговечности ГМКП автобусов, массово эксплуатируемых в России.

При этом надежность АТС в эксплуатации является ключевым фактором эффективности и безопасности городских перевозок, а повышение автоматизации агрегатов подтверждает актуальность данной проблемы. Долговечность, как составное свойство надежности, определяет ресурс агрегата до наступления предельного состояния, что особенно важно для городских автобусов, работающих в интенсивном режиме.

Основоположниками теории надежности в России являются А.И. Берг, Н.Г. Бруевич, Б.В. Гнеденко, А.М. Половко и др., а по вопросам оценки эксплуатационной надёжности в области автомобильного транспорта, его

узлов и агрегатов посвящены работы Бухарина Н.А., Бедняка М.Н., Веревкина Н.И., Давыдова Н.А., Егорова А.Б., Индикта Е.А., Кривенко Е.И., Кузнецова Е.С., Калявина В.П., Панькова Н.П., Черняйкина В.А., Шейнина А.М. и др.

Факторы, влияющие на надёжность транспортных средств и его агрегаты, системы, узлы, механизмы и элементы представлены на рисунке 1.1 [7].



Рисунок 1.1 – Факторы, влияющие на надёжность транспортных средств и его агрегаты, системы, узлы, механизмы и элементы

Фактическая эксплуатационная надежность выявляется только в процессе эксплуатации. Выбор ее количественных показателей зависит от вида объекта. Для невосстанавливаемых объектов (например, комплекта стальных и фрикционных дисков ГМКП) надежность характеризуется безотказностью, долговечностью и сохраняемостью [8, 9].

Проведенный анализ профильной литературы работ В.И. Кудинова, В.А. Коваленко, В.А. Аметова, А.Д. Кустикова, С.А. Ляпина, Ю.А. Власова, М.А. Григорьева, В.Л. Пильщикова, В.Н. Гордивского, В.Ю. Гумелёва, В.В. Череватенко, Д.А. Маньшева, М.В. Селезнева и др. показал, что существующие подходы к повышению долговечности агрегатов трансмиссии можно разделить на конструкторско-технологические (модернизация узлов), химико-трибологические (модификация СМ присадками) и эксплуатационные

(корректировка и определение периодичности ТО и Р). Наиболее близкими к разрабатываемому методу являются работы, использующие контроль физико-химических параметров СМ для диагностики и прогнозирования ресурса.

Выявлено, что методы Кудинова В.И. [10] и Кустикова А.Д. [11] обосновывают периодичность замены СМ на основе экономического критерия или формулы изнашивания И.В. Крагельского [12, 13], но без учета прямых триботехнических характеристик узлов ГМКП. Метод Коваленко В.А. [14] наиболее близок по объекту (гидромеханические передачи), но ориентирован на диагностику отказов и их причин, а не на корректировку периодичности ТО. Работы Аметова В.А. [15] рассматривают модификацию СМ, однако не содержат экспериментального обоснования момента перехода агрегата в аварийную зону эксплуатации. Метод Ляпина С.А. [16] основан на вероятностно-статистическом управлении надежностью, но не учитывает физико-химические изменения работающего СМ. Власов Ю.А. [17] предлагает электрофизические методы диагностики, однако они не позволяют напрямую оценить триботехнические характеристики пары трибосопряжения. Метод Пильщикова В.Л. [18] основан на восстановлении свойств СМ (очистка + корректировка присадками) без его замены, что не позволяет управлять периодичностью ТО с учетом фактического износа. Гордивский В.Н. с соавторами [19] определяют оптимальные сроки замены трансмиссионного СМ по расчетной скорости изнашивания лимитирующей шестерни, однако эмпирическая формула не учитывает реальных триботехнических характеристик узлов ГМКП. Маньшев Д.А. и Селезнев М.В. [20, 21] предложили экспериментальный метод оценки качества СМ ТСп-15К по пяти физико-химическим показателям, однако их подход ограничен только анализом свойств СМ и не включает триботехнические испытания фрикционной пары, лимитирующей ресурс ГМКП.

Следовательно, несмотря на разнообразие предлагаемых решений, большинство авторов рассматривают либо отдельные физико-химические показатели СМ, либо вероятностные модели надежности, при этом

отсутствует комплексный подход, системно связывающий изменение триботехнических характеристик узлов трения ГМКП с физико-химическими параметрами работающего СМ в реальных условиях эксплуатации городских автобусов, что необходимо для объективной оценки и последующего повышения долговечности агрегатов трансмиссии.

Несмотря на наличие различных подходов к повышению эксплуатационной надежности и долговечности агрегатов трансмиссии (В.И. Кудинов, В.А. Коваленко, В.А. Аметов, А.Д. Кустиков, С.А. Ляпин, Ю.А. Власов, М.А. Григорьев, В.Л. Пильщиков, В.Н. Гордивский, В.Ю. Гумелёв, В.В. Череватенко, Д.А. Маньшев, М.В. Селезнев и др.), их применение для ГМКП городских автобусов, эксплуатируемых в условиях мегаполиса, не обеспечивает комплексного решения поставленной научной задачи.

Конструкторско-технологические методы требуют вмешательства в конструкцию агрегата, химико-трибологические – не всегда реализуемы в текущем процессе эксплуатации, а существующие эксплуатационные методы носят фрагментарный характер, не учитывают систематизированные зависимости изменения триботехнических параметров узлов трения и физико-химических параметров работающих СМ от наработки в современных условиях интенсивного городского трафика. В связи с этим для выявления фактических закономерностей изменения технического состояния ГМКП и обоснования рациональной периодичности их ТО проведён сбор и анализ статистической информации эксплуатационной надежности по данным крупнейшего пассажирского перевозчика Северо-Западного региона России – Санкт-Петербургского государственного унитарного предприятия пассажирского автомобильного транспорта «Пассажиравтотранс» (ГУП ПАТ).

1.2 Анализ эксплуатационной надежности ГМКП в городской среде

Анализ эксплуатационной надежности ГМКП городских автобусов выполнен на основе статистической информации, собранной при их эксплуатации на базе линейного подвижного состава ГУП ПАТ.

Подвижной состав данного предприятия состоит из автобусов различных марок, моделей и классов: среднего класса (СК), большого класса (БК) и особо-большого класса (ОБК), которые эксплуатируются в мегаполисах России.

Схема процесса сбора и накопления информации о эксплуатационной надежности АТС представлена на рисунке 1.2.

Сбор данных об эксплуатационной надежности ГМКП осуществлялся с использованием программы «1С:ERP Управление предприятием». При возникновении неисправностей и отказов в ней формируются электронные документы «Заказы на ремонт», содержащие информацию о транспортном средстве, модели ГМКП, пробеге, причине и объёме ремонтных работ, продефектованных деталях и трудоёмкости [22]. Совокупность этих документов образует базу статистических данных, накопленную в процессе фактической эксплуатации автобусов.

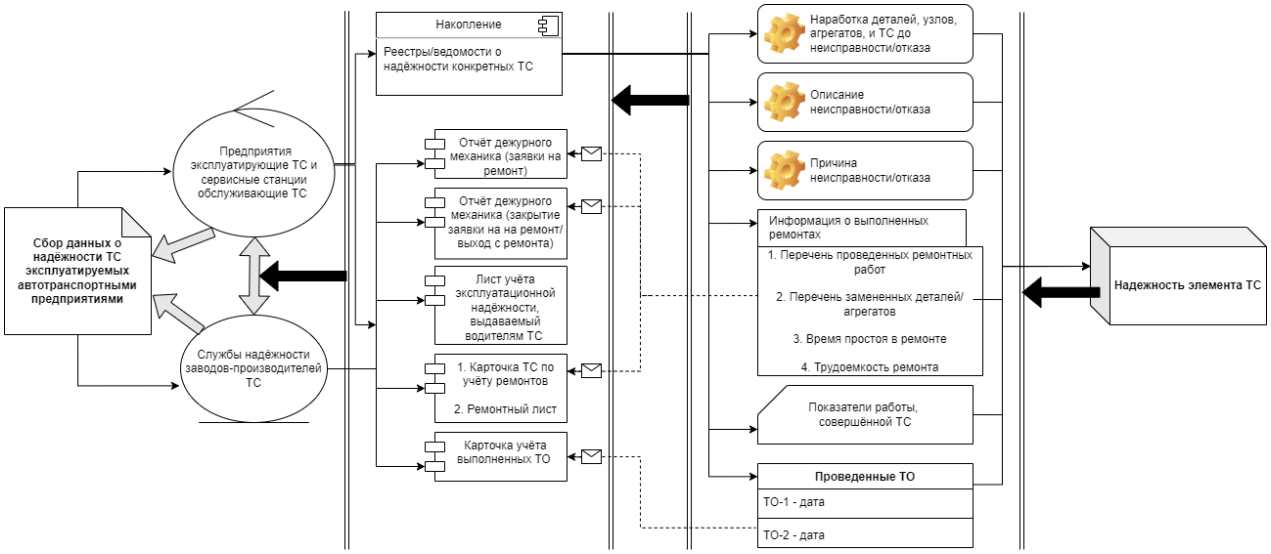


Рисунок 1.2 – Схема процесса сбора и накопления информации о эксплуатационной надежности АТС

Вид цифрового документа «Заказ на ремонт» в программе «1С:ERP Управление предприятием» представлен в приложении Б.

В период с начала 2022 года по конец 2024 года подвижной состав ГУП ПАТ насчитывал в среднем 2000 автобусов, оснащённых ГМКП, основную массу которых составляли городские автобусы БК и ОБК. На основе статистической информации, сформированной по данным цифровых документов «Заказ на ремонт» в программе «1С:ERP Управление предприятием», выполнен структурный анализ эксплуатационной надежности указанных типов подвижного состава.

Результаты анализа структурной эксплуатационной надежности городского автобуса БК представлены на рисунке 1.3.

По результатам анализа структурной надежности в обоих классах автобусов наименее надежной признана система электрооборудования. Надежность трансмиссии составила: для автобусов БК – около 83 % (7-е место из 20), для автобусов ОБК – около 53 % (3-е место из 20).

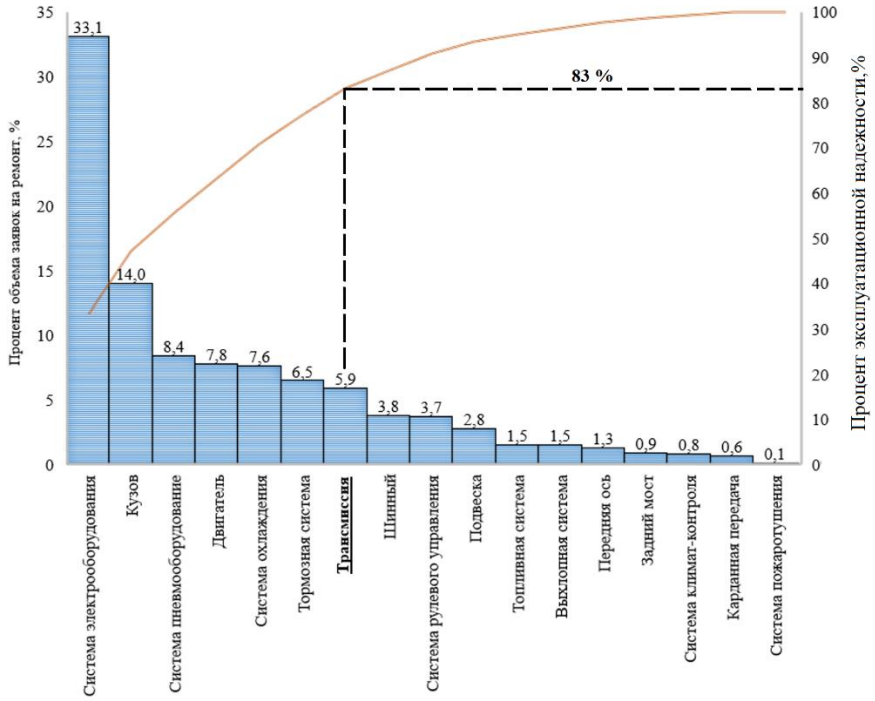


Рисунок 1.3 – Результаты анализа структурной эксплуатационной надежности городского автобуса БК

Результаты анализа структурной эксплуатационной надежности городского автобуса ОБК представлены на рисунке 1.4.

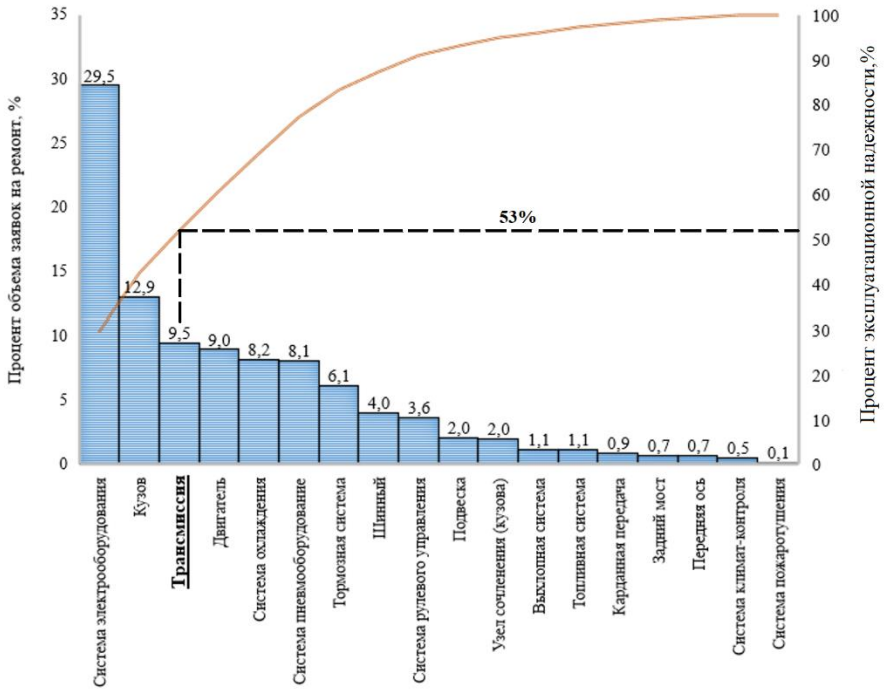


Рисунок 1.4 – Результаты анализа структурной эксплуатационной надежности городского автобуса ОБК

Следовательно, рекомендованные мероприятия по ТО ГМКП на автобусах ОБК требуют детального исследования эксплуатационной надежности для выявления ГМКП с низким ресурсом до капитального ремонта.

Списочное количество эксплуатируемых ГМКП в ГУП ПАТ с начала 2022 года по конец 2024 года представлено в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Списочное количество эксплуатируемых ГМКП в ГУП ПАТ с начала 2022 года по конец 2024 года

№ п/п	Марка и модель ГМКП	Года эксплуатации		
		2022	2023	2024
		Количество в эксплуатации, шт.		
1.	Allison T310w/Ret	1	2	1
2.	Allison T325w/Ret	135	135	135
3.	Allison T375w/Ret	101	255	255
4.	Voith DIWA D854.3E	323	263	250
5.	Voith DIWA D854.5	2	2	2
6.	Voith DIWA D854.6	0	0	69

№ п/п	Марка и модель ГМКП	Года эксплуатации		
		2022	2023	2024
		Количество в эксплуатации, шт.		
7.	Voith DIWA D863.3E	15	14	0
8.	ZF EcoLife 1/6AP1000B	0	0	30
9.	ZF EcoLife 1 6AP1200B	323	325	326
10.	ZFEcoLife 2 6AP1220B	0	0	20
11.	ZF EcoLife 1 6AP1400B	187	286	286
12.	ZF EcoLife 1 6AP1700B	238	238	238
13.	ZF Ecomat 2 6HP502C	163	133	50
14.	ZF Ecomat 4 6HP504C	351	286	269
15.	ZF Ecomat 4 6HP594C	30	30	30
16.	ZF 5HP502C	49	34	0
17.	ZF 5HP602C	24	2	0
18.	ZF 5HP602CN	2	1	0
	Итого	1944	2006	1961

В ГУП ПАТ в 2022–2024 гг. массово эксплуатировались ГМКП производителей Allison (T325w/Ret, T375w/Ret), Voith (DIWA D854.3E) и ZF (EcoLife 1 6AP1200B, 6AP1400B, 6AP1700B; Ecomat 2 6HP502C, 6HP504C).

Динамика распределения количества эксплуатируемых ГМКП по автобусным паркам (филиалам) ГУП ПАТ в 2022–2024 гг. представлена на рисунке 1.5.

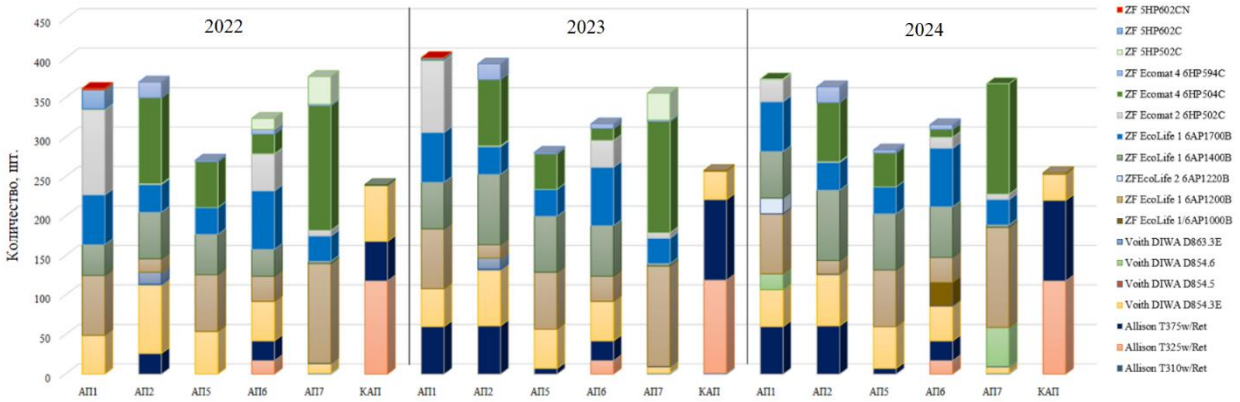


Рисунок 1.5 – Динамика распределения количества эксплуатируемых ГМКП по автобусным паркам (филиалам) ГУП ПАТ в 2022–2024 гг.

Из таблицы 1.2 и рисунка 1.5 видно, что общее количество эксплуатируемых ГМКП по предприятию сохраняется в течение рассматриваемых трёх лет в диапазоне 2000 единиц, однако модели и

количество ГМКП изменяются. Ежегодно приобретаются новые автобусы и выводятся из эксплуатации старые с последующей дефектовкой для выявления годных остаточных ресурсов и их вторичного использования либо утилизации.

Перечень применяемых СМ и периодичность их замены для массово эксплуатируемых ГМКП в ГУП ПАТ представлен в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Перечень применяемых СМ и периодичность их замены для массово эксплуатируемых ГМКП в ГУП ПАТ

Марка и модель ГМКП	Маркировка СМ	Периодичность замены СМ, тыс.км.
Allison T310w/Ret	Shell Spirax S6 ATF A295	240
Allison T325w/Ret	Shell Spirax S6 ATF A295	240
Allison T375w/Ret	Shell Spirax S6 ATF A295	240
Voith DIWA D854.3E	RosneftKinetik ATF III	60
Voith DIWA D854.5	RosneftKinetik ATF III	60
Voith DIWA D854.6	RosneftKinetik ATF III	60
Voith DIWA D863.3E	RosneftKinetik ATF III	60
ZF EcoLife 1/6AP1000B	Shell Spirax S6 ATF ZM	180
ZF EcoLife 1 6AP1200B	Shell Spirax S6 ATF ZM	180
ZFEcoLife 2 6AP1220B	Shell Spirax S6 ATF ZM	180
ZF EcoLife 1 6AP1400B	Shell Spirax S6 ATF ZM	180
ZF EcoLife 1 6AP1700B	Shell Spirax S6 ATF ZM	180
ZF Ecomat 2 6HP502C	Shell Spirax S6 ATF ZM	150
ZF Ecomat 4 6HP504C	Shell Spirax S6 ATF ZM	150
ZF Ecomat 4 6HP594C	Shell Spirax S6 ATF ZM	150
ZF 5HP502C	Shell Spirax S6 ATF ZM	150
ZF 5HP602C	Shell Spirax S6 ATF ZM	150
ZF 5HP602CN	Shell Spirax S6 ATF ZM	150

Сопоставление таблиц 1.2 и 1.3 показало, что за рассматриваемый период доля ГМКП с периодичностью ТО от 180 до 240 тыс. км составила 66 % от общего списочного количества подвижного состава ГУП ПАТ.

Для анализа эксплуатационной надежности ГМКП собрана статистическая информация по наиболее массово эксплуатируемым моделям за рассматриваемый период. Собранные данные систематизированы в табличной форме в прикладном программном обеспечении для последующей структурно-статистической обработки. Фрагмент статистической выборки

отказов ГМКП по подвижному составу ГУП ПАТ представлен в приложении В.

Общий массив собранной информации включает 1005 случаев отказов ГМКП. На его основе сформирована матрица взаимосвязи признаков и причин отказов, представленная в приложении Г, для проведения комплексно-структурного анализа эксплуатационной надежности ГМКП автобусов.

В рамках комплексно-структурного анализа выполнен количественный анализ надежности [7], позволивший рассчитать основные показатели безотказности и долговечности.

При оценке безотказности учитывалась статистика частичных отказов ГМКП (частично не работоспособное состояние – ремонт по восстановлению работоспособного состояния не требуется). Для количественной оценки безотказности рассчитывались следующие показатели [8]:

1. Средняя наработка на отказ, $\bar{x}$ (тыс. км), показывает математическое ожидание наработки или времени работы ГМКП до частичного отказа.

2. Среднеквадратическое отклонение наработки на отказ, σ_x (тыс. км), определяет рассеивание наработки на отказ ГМКП и характеризует разброс частичных отказов относительно центра распределения плотности данной наработки.

3. Коэффициент вариации наработки на отказ, υ_x, показывает, насколько велико рассеивание наработок частичных отказов ГМКП по сравнению со средним значением ряда наработок на отказ. Чем ниже средняя наработка на отказ и выше коэффициент вариации, тем ниже надежность конструкции агрегата или качество регламентированных технологических процессов его технического обслуживания.

4. Частость отказов, ω_i, является эмпирической оценкой вероятности отказа по рассматриваемой эксплуатационной статистики конкретной модели ГМКП автобуса. Значение данного показателя позволяет предположить, что у

аналогичных ГМПК при тех же условиях эксплуатации в рассматриваемом интервале наработки может наблюдаться случай отказа.

5. Вероятность отказов, F_x (%), показывает прогноз вероятности отказа ГМКП при рассматриваемом интервале наработки.

6. Вероятность безотказности, R_x (%), противоположно вероятности отказа, и, следовательно, показывает вероятность безотказной работы аналогичных ГМПК при тех же условиях эксплуатации в рассматриваемом интервале наработки.

Сводный график рассчитанных показателей безотказности по анализируемым ГМКП представлен на рисунке 1.6.

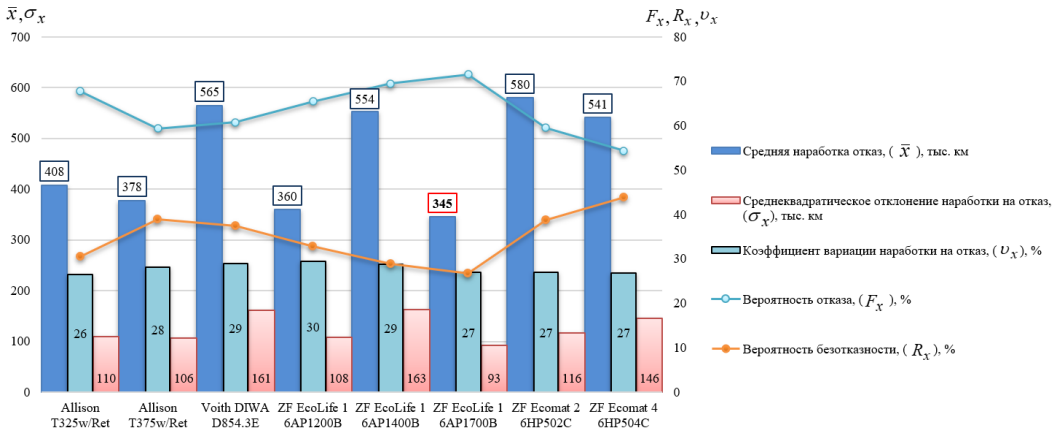


Рисунок 1.6 – Сводный график рассчитанных показателей безотказности по анализируемым ГМКП

Согласно представленным результатам на рис. 1.6 наименьший фактический уровень эксплуатационной надежности имеет ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B, так как среди аналогичных ГМКП средняя наработка на отказ составила – 345 тыс.км со средним однородным коэффициентом вариации, по условию [8]: $(0{,}1 \le \upsilon_x \le 0{,}33)$, составляет $0{,}1 \le 0{,}27 \le 0{,}33$, что позволяет предполагать о низкой надежности конструктивных деталей агрегата или о низком качестве регламентированных технологических процессов по его ТО.

Гистограмма распределения частости возникновения отказов ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B представлена на рисунке 1.7.

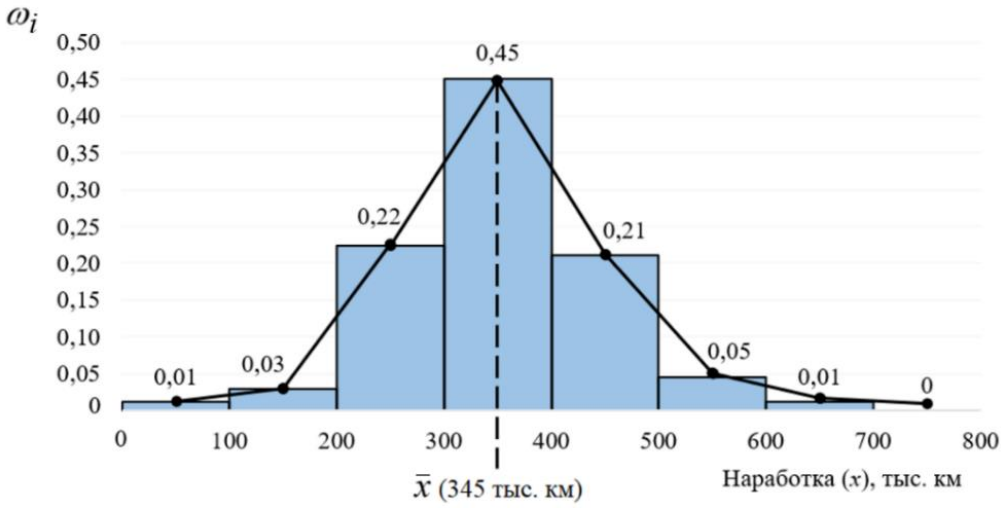


Рисунок 1.7 – Гистограмма распределения частости возникновения отказов ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B

По результатам построенной гистограммы видно, что для проанализированных случаев отказов в процессе технической эксплуатации ГМКП характерен нормальный закон распределения. Также по построенной гистограмме можно прогнозировать, что у аналогичных ГМПК данной модели в тех же условиях эксплуатации в интервале наработки 200-300 тыс. км может отказать около 22% от общего числа данных агрегатов, в интервале наработки 300-400 тыс. км – около 45% агрегатов, а далее данная вероятность уменьшается, так как после устранения некачественных деталей наступает интервал приработки и нормального функционирования.

Гистограмма распределения вероятности возникновения отказа и вероятности безотказной работы ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B представлена на рисунке 1.8.

Полученное распределение показывает прогнозирование вероятности возникновения отказа рассматриваемого ГМКП, так, например при интервале наработки 300-400 тыс. км в городских условиях эксплуатации вероятность возникновения случая частичного отказа работоспособности ГМКП равна 50-70%. А вероятность безотказной работы ГМКП к 300 тыс. км составляет меньше 50%.

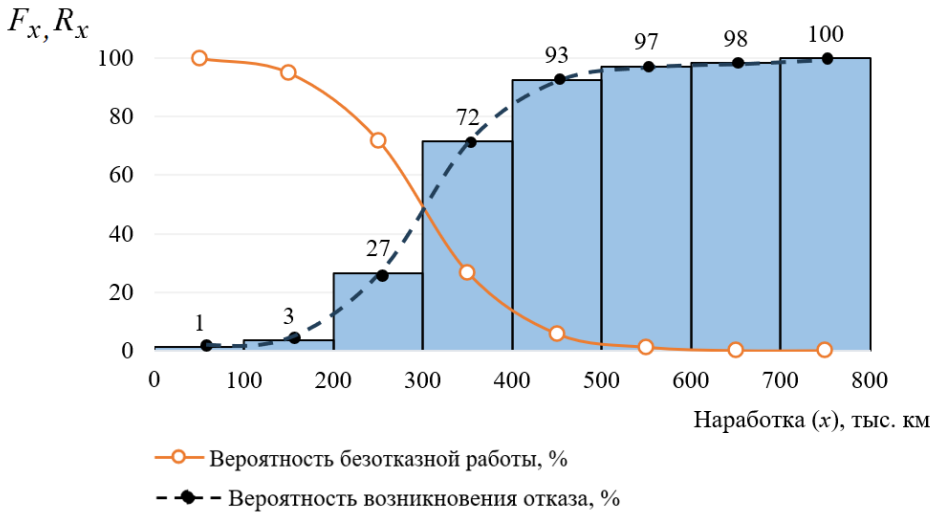


Рисунок 1.8 – Гистограмма распределения вероятности возникновения отказа и вероятности безотказной работы ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B

Распределение числа частичных отказов ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B по выявленным признакам отказов представлено на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Распределение числа частичных отказов ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B по выявленным признакам отказов

Расшифровка кодов признаков отказов представлена в приложении Г.

Представленное распределение сформировано на основе статистики частичных отказов, которые не требуют демонтажа агрегата с автобуса, его транспортировки на специализированный ремонтный участок, а также полной разборки и дефектовки деталей, оно наглядно показывает, что для ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B наиболее характерны следующие признаки частичных отказов:

– проскальзывание или пробуксовка передач (2102);
– нет движения после активации передачи (2108);
– разрегулировка в выборе передач (2109);
– течь смазочного материала (2110).

Данные признаки в основном обусловлены электрическими причинами возникновения отказов. Механические причины отказов в большей степени повлияли на ресурс – срок службы агрегата.

Для оценки ресурса рассматриваемых моделей ГМКП были проведены расчёты показателей долговечности. Эти показатели отражают ресурс анализируемого агрегата до капитального ремонта.

При расчете показателей долговечности учитывалась статистика полных отказов (неработоспособное состояние – требуется ремонт по восстановлению работоспособного состояния) ГМКП, однако следует отметить, что при сборе данной статистики отбирались случаи первичного капитального ремонта после даты приобретения предприятием автобусов.

Для количественной оценки долговечности были рассчитаны следующие показатели [7, 23]:

1. Средний ресурс, $\overline{T}_{рес}$ (тыс. км), показывает математическое ожидание наработки ресурса с учетом восстановления работоспособности ГМКП после частичного отказа или времени работы ГМКП при, которой сохранялась его работоспособность до наступления полного отказа.

2. Среднеквадратическое отклонение наработки ресурса, σ_T (тыс. км), определяет рассеивание значений полных отказов, т.е. ресурса до полного

неработоспособного состояния ГМКП и характеризует их разброс относительно центра распределения плотности данной наработки.

3. Коэффициент вариации ресурса, υ_T, показывает, насколько велико рассеивание наработок полных отказов ГМКП по сравнению со средним значением ряда наработок на отказ. Чем ниже средний ресурс и выше коэффициент вариации, тем ниже долговечность конструкции агрегата или качество регламентированных технологических операций при проведении ТО.

4. Средний срок службы, $T_{сл}$ (годы), ГМКП до полной потери работоспособности и необходимости проведения капитального ремонта.

Сводный график рассчитанных показателей долговечности по анализируемым ГМКП представлен на рисунке 1.10.

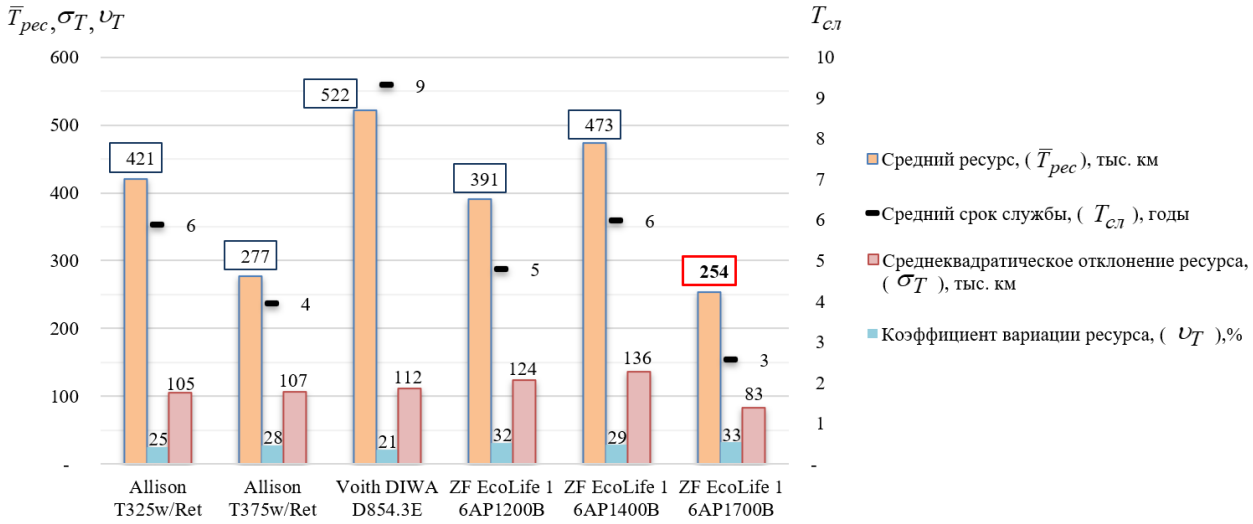


Рисунок 1.10 – Сводный график рассчитанных показателей долговечности по анализируемым ГМКП

ГМКП ZF Ecomat 2 6HP502C и ZF Ecomat 4 6HP504C по показателям долговечности не анализируются, так как за рассматриваемый период, согласно собранной статистике, первичные капитальные ремонты не проводились, а также следует отметить, что срок эксплуатации (полезного использования) автобусов составляет 10 лет, по истечению которых подвижной состав утилизируется [24].

Согласно представленным результатам на рис. 1.10 наименьшие значение наработки до первого полного отказа, характеризующего ресурс агрегата до проведения дорогостоящего капитального ремонта имеет ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B, так как среди аналогичных ГМКП средний срок службы до первого ремонта составил 3 года, средний ресурс составил – 254 тыс. км со средним однородным коэффициентом вариации, по условию [8] : $0{,}1 \le \upsilon_x \le 0{,}33$, что позволяет предполагать о низкой надежности конструктивных или СМ агрегата, а также о низком качестве разработанных регламентированных технологических операций ТО.

Гистограмма распределения вероятности полного отказа в ресурсных интервалах наработки ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B представлен на рисунке 1.11.

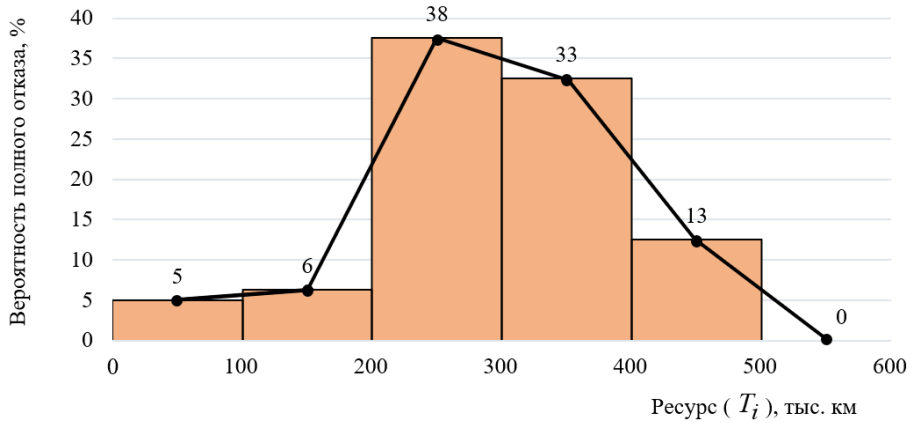


Рисунок 1.11. – Гистограмма распределения вероятности полного отказа в ресурсных интервалах наработки ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B

Гистограмма показывает, что при наработке ГМКП в интервале 100–200 тыс. км вероятность полного отказа, требующего капитального ремонта, составляет около 6 %. В интервале 200–300 тыс. км она резко возрастает до 40 %, а затем снижается, поскольку после этого интервала большинство однотипных агрегатов уже отремонтировано.

Гистограмма распределения вероятности капитального ремонта ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B представлен на рисунке 1.12.

Полученное распределение показывает вероятность выхода ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B в капитальный ремонт при достижении определённой наработки. По построенной гистограмме можно прогнозировать необходимость ремонта аналогичных ГМКП данной модели в тех же условиях эксплуатации. Так, например, в интервале наработки 200–300 тыс. км дорогостоящий ремонт может потребоваться для 47 % агрегатов от общего списочного количества.

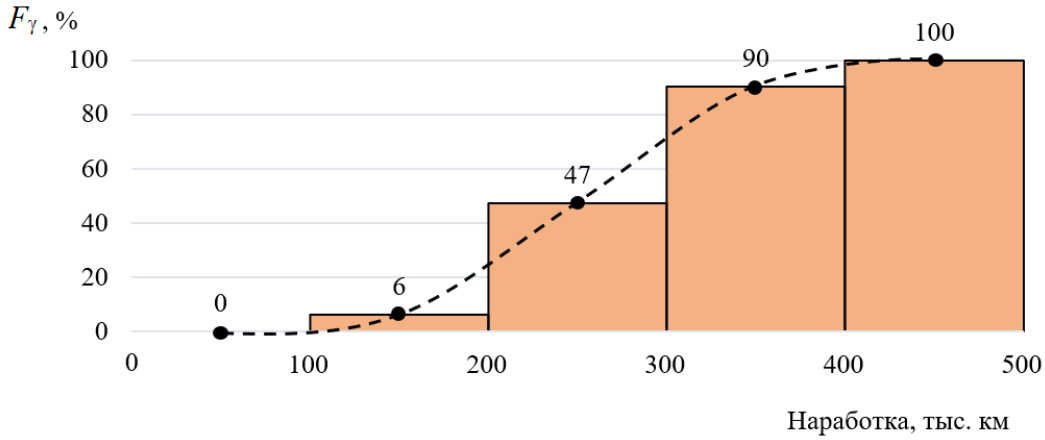


Рисунок 1.12 – Гистограмма распределения вероятности капитального ремонта ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B

При обработке собранной статистики по ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B выявлены комплекты отдефектованных деталей, а также деталей, подлежащих замене при капитальном ремонте.

Номенклатура деталей, подлежащих замене при капитальном ремонте ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Номенклатура деталей, подлежащих замене при капитальном ремонте ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B

Номер комплекта	Перечень деталей
KBP/ZF-EL1-01	Датчик скорости. Клапан электромагнитный. Комплект кабелей. Ремкомплект фрикционов и поршней муфты сцепления «А» и «В». Ступица муфты сцепления «А» и «В». Сапун. Комплект подшипников игольчатых.
KBP/ZF-EL1-02	Датчик скорости. Клапан электромагнитный. Комплект кабелей. Ремкомплект фрикционов и поршней муфты сцепления «А» и «В». Ступица муфты сцепления «А» и «В». Сапун. Комплект подшипников игольчатых. Вал полый. Вал входной.

Номер комплекта	Перечень деталей
KBP/ZF-EL1-03	Датчик скорости. Ремкомплект фрикционов и поршней муфты сцепления «А» и «В». Ступица муфты сцепления «А» и «В». Сапун. Комплект подшипников игольчатых. Вал входной. Радиатор масляный.
KBP/ZF-EL1-04	Датчик скорости. Ремкомплект фрикционов и поршней муфты сцепления «А» и «В». Ступица муфты сцепления «А» и «В». Сапун. Комплект подшипников игольчатых.
KBP/ZF-EL1-05	Клапан электромагнитный. Комплект кабелей. Ремкомплект фрикционов и поршней муфты сцепления «А» и «В». Ступица муфты сцепления «А» и «В». Комплект подшипников игольчатых. Вал полый.

Распределение полных отказов ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B по номенклатуре деталей, подлежащих замене при капитальном ремонте представлено на рисунке 1.13.

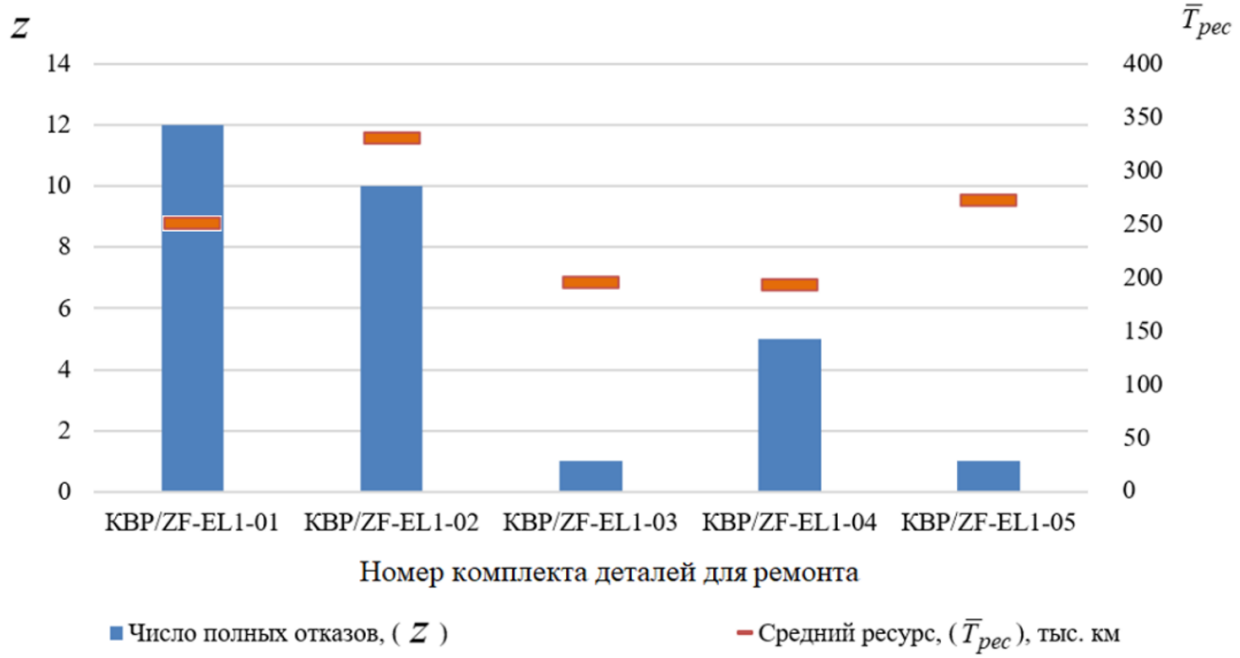


Рисунок 1.13 – Распределение полных отказов ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B по номенклатуре деталей, подлежащих замене при капитальном ремонте

Распределение показывает, что при ремонте чаще всего применяется первый комплект деталей. Анализ дефектовки ГМКП в процессе капитального ремонта выявил: основная причина полного отказа – износ фрикционных дисков муфты сцепления «А», которая отвечает за первую, вторую, третью и четвёртую передачу. Кроме того, органолептический контроль показал, что состояние СМ не соответствует требованиям надёжной эксплуатации ГМКП в данных условиях.

Проведённый анализ позволил определить фактический уровень эксплуатационной надёжности ГМКП в городских условиях, а также выявить наименее надёжную модель из всей совокупности исследованных агрегатов. В ходе анализа установлены технические закономерности, характеризующие связь между наработкой и изменением вероятности технического состояния агрегата.

По результатам анализа эксплуатационной надёжности наименее надёжной при эксплуатации выявлена – ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B. Её ресурс до капитального ремонта составил 254 тыс. км – 33 % от регламентированного ресурса (750 тыс. км), установленного заводом-изготовителем Zahnrad Fabrik при условии соблюдения периодичности ТО. Данная модель устанавливается на автобусы ОБК, на её базе будут проводиться дальнейшие исследования.

Как показывает опыт ГУП ПАТ, в реальных условиях эксплуатации регламентированный ресурс не достигается, что подтверждено анализом капитальных ремонтов ГМКП

На основе проведенного анализ эксплуатауионной надёжности эксплуатируемых ГМКП на автобусах в условиях городской среды разработана схема фактического срока службы автобуса ОБК с установленной на него ГМКП ZF EcoLife1 6AP1700B.

Схема фактического срока службы выявленного наименее надежного ГМКП автобусов ОБК представлена на рисунке 1.14.

Главным элементом данной схемы является ГМКП (ZF EcoLife 1 6AP1700B), устанавливаемая на городские автобусы ОБК (Volgabus 627102 CityRhythm 18), а именно её часть жизненного цикла – эксплуатация. По результатам анализа наглядно видно, что за весь срок службы осуществляется два капитальных ремонта агрегата и два-три ТО (замены СМ и фильтрующего элемента). Следовательно, данная модель имеет наиболее низкий уровень технико-экономической эффективности в процессе эксплуатации среди анализируемых ГМКП.

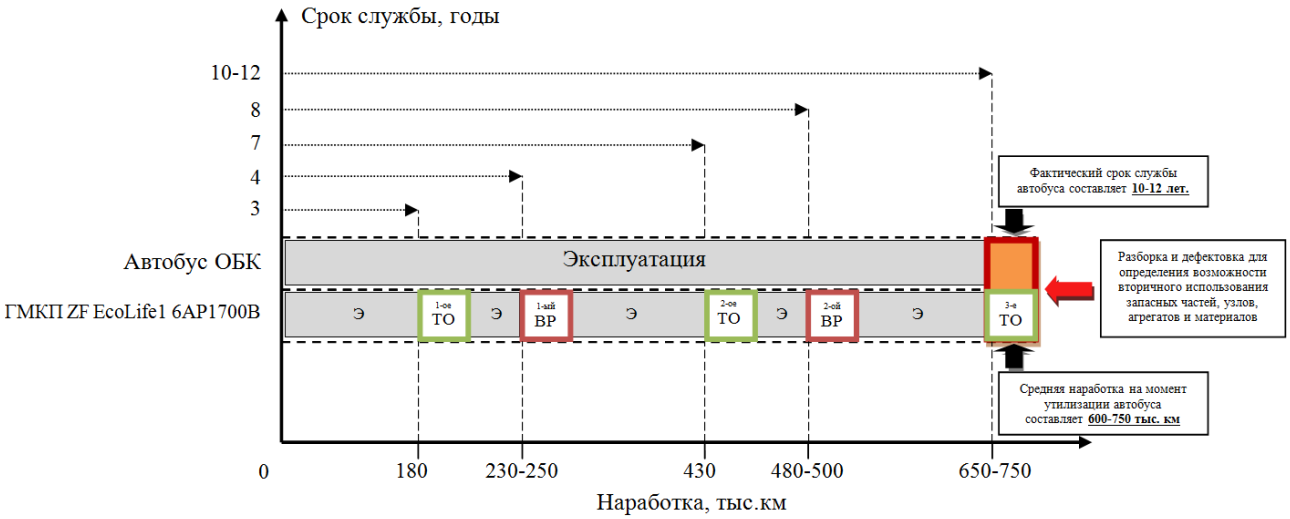


Рисунок 1.14 – Схема фактического срока службы выявленного наименее надежного ГМКП автобусов ОБК

Данная модель городского автобуса эксплуатируется в большинстве густонаселённых городов России. Также важно отметить, что ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B с 2011 года устанавливается на различные модели российских городских автобусов марок ЛиАЗ и Volgabus.

В рамках выполнения поставленных задач исследования предлагается провести подконтрольные испытания СМ ГМКП в реальных условиях эксплуатации. Это позволит определить основные факторы снижения эксплуатационной надежности агрегата и проанализировать их для последующей выработки технических решений без внесения изменений в конструкцию агрегата.

1.3 Анализ применяемых смазочных материалов при эксплуатации

Проблема взаимосвязи эксплуатационной надёжности ГМКП автобусов и регламентированной периодичности замены СМ, установленной согласно технической документации завода-изготовителя (руководство по эксплуатации, химмотологическая карта, спецификация), является одной из актуальных задач технической эксплуатации агрегатов трансмиссии.

Как отмечалось в разделе 1.1, СМ в ГМКП является ключевым рабочим элементом, обеспечивающим надёжное функционирование всех систем агрегата. Методы испытаний и характеристики основных ФХ параметров СМ ГМКП представлены в приложении Д [3, 4, 25, 26, 27].

Прежде чем перейти к исследованиям ФХ параметров СМ, применяемых при эксплуатации ГМКП автобусов, рассмотрим спецификации СМ, рекомендованных заводами-изготовителями ГМКП, эксплуатируемых в ГУП ПАТ.

Спецификации СМ ГМКП, эксплуатируемых в ГУП ПАТ в 2022–2024 гг. представлен в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Спецификации СМ ГМКП, эксплуатируемых в ГУП ПАТ в 2022–2024 гг.

Обозначение спецификации трансмиссионного СМ	Марка, модель/ серия ГМКП	Маркировка трансмиссионного СМ	Периодичность ТО, тыс.км.
Allison Operator's Manual OM8491EN	Allison T310w/Ret	Shell Spirax S6 ATF A295	240
Allison Operator's Manual OM8491EN	Allison T325w/Ret	Shell Spirax S6 ATF A295	240
Allison Operator's Manual OM8491EN	Allison T375w/Ret	Shell Spirax S6 ATF A295	240
VOITH H55.633551	Voith DIWA D854.3E	RosneftKinetik ATF III	60
VOITH H55.633551	Voith DIWA D854.5	RosneftKinetik ATF III	60
VOITH H55.633551	Voith DIWA D854.6	RosneftKinetik ATF III	60
VOITH H55.633551	Voith DIWA D863.3E	RosneftKinetik ATF III	60
ZF TE-ML-20	ZF EcoLife 1 6AP1000B	Shell Spirax S6 ATF ZM	180
ZF TE-ML-20	ZF EcoLife 1 6AP1200B	Shell Spirax S6 ATF ZM	180
ZF TE-ML-20	ZF EcoLife 2 6AP1220B	Shell Spirax S6 ATF ZM	180
ZF TE-ML-20	ZF EcoLife 1 6AP1400B	Shell Spirax S6 ATF ZM	180
ZF TE-ML-20	ZF EcoLife 1 6AP1700B	Shell Spirax S6 ATF ZM	180
ZF TE-ML-14	ZF Ecomat 2 6HP502C	Shell Spirax S6 ATF ZM	150
ZF TE-ML-14	ZF Ecomat 4 6HP504C	Shell Spirax S6 ATF ZM	150
ZF TE-ML-14	ZF Ecomat 4 6HP594C	Shell Spirax S6 ATF ZM	150
ZF TE-ML-14	ZF 5HP502C	Shell Spirax S6 ATF ZM	150
ZF TE-ML-14	ZF 5HP602C	Shell Spirax S6 ATF ZM	150
ZF TE-ML-14	ZF 5HP602CN	Shell Spirax S6 ATF ZM	150

Согласно представленным в таблице данным, в ГУП ПАТ эксплуатируется 4 марки ГМКП, образующих 18 модельных разновидностей. При этом для их обслуживания используется лишь 3 марки СМ. Установлено,

что регламентированная периодичность замены СМ варьируется в диапазоне от 60 до 240 тыс. км в зависимости от спецификаций. В этой связи ключевым вопросом исследования является определение рационального значения периодичности ТО, обеспечивающей эксплуатационную надежность в одинаковых условиях.

Фрагменты спецификаций СМ, применяемых при эксплуатации ГМКП автобусов в ГУП ПАТ, представлены в Приложении Е.

Значения периодичности ТО ГМКП ZF официально регламентированы ООО «ЦФ РУССИЯ» (ZF Russia) – представителем компании Zahnrad Fabrik в Санкт-Петербурге. Согласно их данным, температура в поддоне ГМКП ZF, установленных на городские автобусы, в процессе эксплуатации не превышает 105 °С, что позволяет применять СМ с соответствующей данному температурному классу периодичностью.

Для ГМКП ZF городских автобусов и грузовых транспортных средств компания ZF разработала специальное СМ под маркой ZF-Ecofluid A Life, которое также указано в спецификациях ZF TE-ML-20 (классификация 20F) и ZF TE-ML-14 (классификация 14E). Однако, учитывая высокую стоимость данного СМ, нестабильность его поставок, а также отсутствие подтверждённых данных о достижении регламентированного ресурса ГМКП при его применении в реальных условиях, руководство ГУП ПАТ приняло решение использовать регламентируемый по спецификации аналог по температурному классу – Shell Spirax S6 ATF ZM.

Из представленных фрагментов технических документов следует, что периодичность замены СМ для конкретной ГМКП определяется классификацией СМ, установленной заводом-изготовителем. Однако в доступной технической документации отсутствуют сведения о результатах ресурсных испытаний СМ, перечисленных в таблице 1.8, при эксплуатации ГМКП автобусов в условиях мегаполиса.

Следовательно, рациональность существующих регламентированных сроков замены СМ требует проверки путём проведения ресурсных

исследований, а именно мониторинга изменения ФХ параметров и параметров триботехнической системы, в которой циркулирует СМ, в ходе подконтрольной эксплуатации системы «среда – агрегат – СМ». Это обусловлено тем, что периодичность замены СМ оказывает непосредственное влияние на уровень эксплуатационной надёжности ГМКП автобусов.

Исследования ФХ параметров новых (без наработки) СМ ГМКП, применяемых при эксплуатации автобусов в ГУП ПАТ производились в условиях сертифицированной специальной лаборатории Санкт-Петербургского филиал испытательного центра АО «СЖС Восток Лимитед».

Результаты исследований СМ ГМКП без наработки, применяемых в ГУП ПАТ при эксплуатации автобусов представлены в таблице 1.6 [28, 29].

Таблица 1.6 – Результаты исследований СМ ГМКП без наработки, применяемых в ГУП ПАТ при эксплуатации автобусов

Наименование смазочного материала			Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF A295	Rosneft Kinetik ATF III	ZF-Ecofluid A Life
Наработка смазочного материала в агрегате, км			0	0	0	0
Физико-химические параметры		Стандарт метода испытаний	-	-	-	-
Кинематическая вязкость при 100ºС, (мм^2/с)		ASTM D445-06	10,12	7,22	7,97	10,24
Кинематическая вязкость при 40ºС, (мм^2/с)			56,46	36,01	40,50	55,86
Индекс вязкости		ASTM D2270-10	169	170	172	174
Кислотное число, (мг КОН/г)		ASTM D664-18	0,74	2,47	0,56	0,75
Температура застывания, (°С)		ГОСТ 20287-91 Б	-56	-60	-53	-57
Температура вспышки в открытом тигле, (°С)		ASTM D92-18	232	226	212	238
Плотность 15 °С, (кг/м³)		ASTM D4052-22	838,5	861,2	869,8	842,00
Содержание воды (метод Карла Фишера), (%)		ASTM D6304-07	0,014	0,084	0,023	0,026
Массовая доля механических примесей, (%масс)		ASTM D473-22	0	0	0	0
Массовая доля серы, (%)		ASTM D 4294-10	0,082	0,294	0,061	0,086
Коррозия медной пластинки, (балл)		ASTM D 130–10	1a	1a	1a	1a
Элементная спектрометрия (Массовая доля химического элемента):	Фосфор (P), (мг/кг)	ASTM D 5185-18	300	544	324	206
	Кальций (Ca), (мг/кг)		120	188	30	61
	Бор (B), (мг/кг)		110	255	78	99
	Кремний (Si), (мг/кг)		21	0	15	0
	Цинк (Zn), (мг/кг)		20	3	263	2

Лабораторный отчет результатов исследований СМ ГМКП без наработки, применяемых в ГУП ПАТ при эксплуатации автобусов представлен в приложении Ж.

По результатам исследований СМ установлено, что они имеют относительно равные индексы вязкости, находящиеся в пределах минимальных нормативных значений для данного агрегата. Однако значения кинематической вязкости при анализируемых температурах различаются, что приводит к различиям в динамических нагрузках при прокачивании СМ по каналам к деталям агрегата, а также при их перемещении или сжатии. При этом дефицит СМ и его питтинговый перегрев, ведущие к форсированному износу, не возникают. Следует отметить, что данные вязкостно-температурные параметры являются ключевыми при определении браковочных норм СМ в процессе эксплуатации, а их нормативные значения устанавливаются заводом-изготовителем агрегата для обеспечения его работоспособного состояния.

Можно предположить, что наиболее долговечным из рассматриваемых СМ является СМ Shell Spirax S6 ATFA295. Оно обладает наиболее универсальными значениями вязкостно-температурных параметров и высокой температурной стойкостью к застыванию. Имеет объемный состав присадок в отличии от конкурентов, ввиду чего значение кислотного числа значительно больше. Комплекс присадок состоит из противоизносных и противозадирных: фосфор (P), цинк (Zn), бор (B), сера (S); моющих или диспергирующих: кальций (Ca); антиокислительных: цинк (Zn), фосфор (P); антикоррозионных: цинк (Zn), фосфор (P) присадок, а также содержит модификаторы трения: сера (S) и фосфор (P) для фрикционных дисков (пакетов сцепления и тормозов). Снижая случаи проскальзывания фрикционных дисков при их сжатии (включение фрикционных муфт), а также снижая уровень шума и вибрации, что повышает плавность работы всех узлов ГМКП.

Результаты элементной спектрометрии комплекса присадок СМ для ГМКП, применяемых при эксплуатации автобусов в ГУП ПАТ представлены на рисунке 1.15.

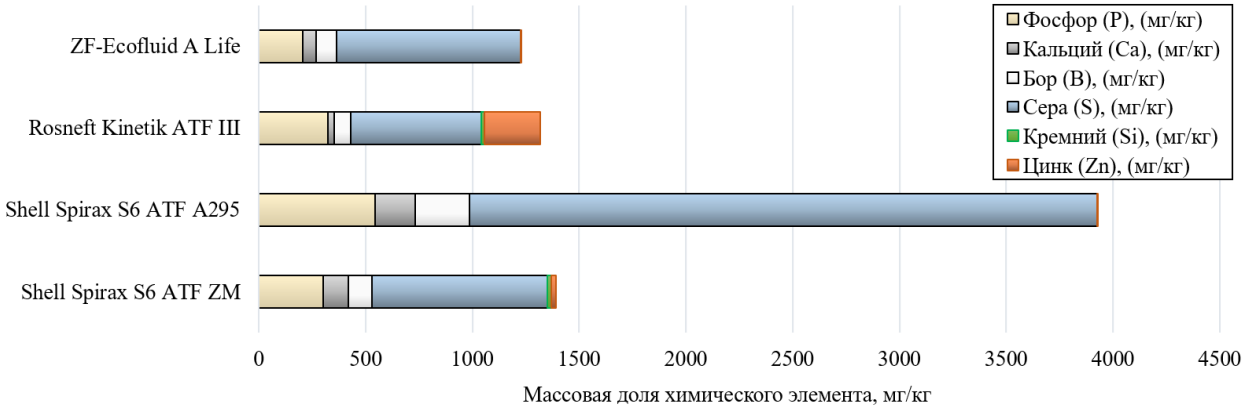


Рисунок 1.15 – Результаты элементной спектрометрии комплекса присадок СМ для ГМКП, применяемых при эксплуатации автобусов в ГУП ПАТ

Изменение химического состава СМ и базовых масел, входящих в рецептуру, в процессе эксплуатации объективно подтверждается сравнительной оценкой инфракрасных спектров (наложением графиков пиков поглощения), полученных методом инфракрасной спектроскопии по стандарту ASTM E2412-2023.

На основе анализа опубликованных данных об инфракрасных спектрах российских и зарубежных исследователей в области спектроскопии СМ, применяемых в транспортных средствах [5, 6, 27, 30, 31, 32, 33], можно выделить следующие основные значения волновых чисел, соответствующие ключевым пикам поглощения в моторных и трансмиссионных СМ:

– 3500 $см^{-1}$ – ОН-группы (кислоты и спирты);

– 3000–3100 $см^{-1}$ – СН-связи ароматического характера;

– 2940–2960 и 1360–1380 $см^{-1}$ – CH_3-группы (концевые углеводородные радикалы);

– 2860–2870 и 1440–1470 $см^{-1}$ – СН-связи алифатического характера;

– 1720–1750 $см^{-1}$ – С=О карбонильная группа (сложные эфиры);

– 1600 $см^{-1}$ – ароматические структуры бензольного ряда;

– 1400, 1220, 1160–1100 см$^{-1}$ – алифатические эфиры;

– 720–750 см$^{-1}$ – C-S-валентные связи (полиальфаолефины).

По данным параметрам оценивают состав и качество СМ, включая природу базовых масел и химических компонентов, что определяет его эксплуатационные свойства (противоизносные, противозадирные, вязкостно-температурные и др.) и прогнозируемый срок службы. Метод инфракрасной спектроскопии позволяет оценивать степень изменения работающего СМ путём сравнения его спектра с эталонным (истощение присадок, накопление продуктов загрязнения и износа), а также прогнозировать срок службы СМ на основе количественно-качественной оценки рецептурных компонентов и группы базового масла по стандарту API 1509.

Группы основных базовых СМ, применяемых при производстве СМ для ГМКП представлены в приложении И [4, 34].

Результаты сопоставления инфракрасных спектров СМ без наработки для ГМКП, применяемых в ГУП ПАТ при эксплуатации автобусов представлены на рисунке 1.16.

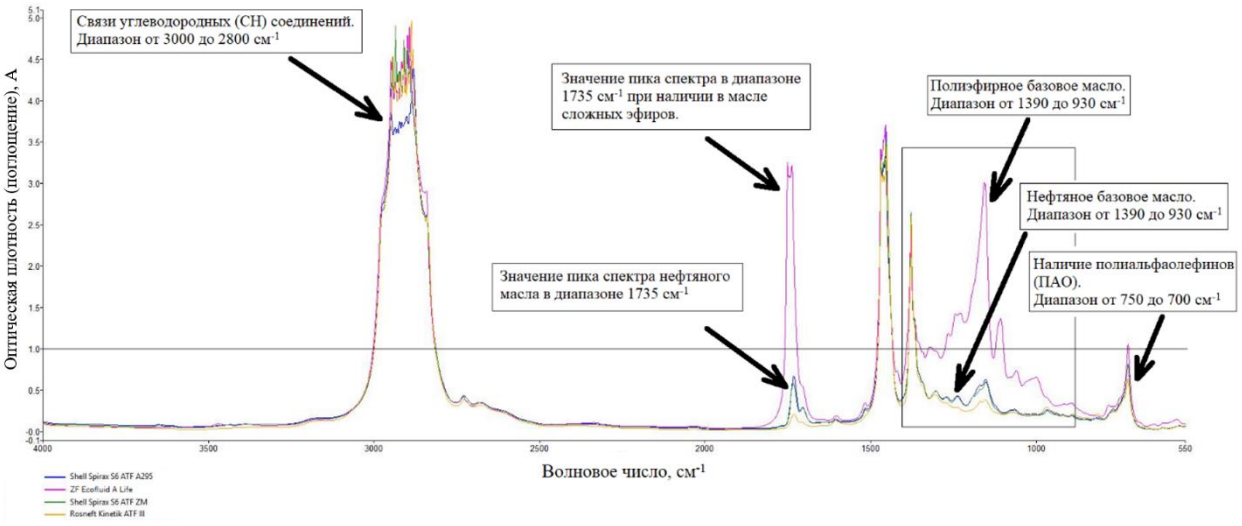


Рисунок 1.16 – Результаты сопоставления инфракрасных спектров СМ без наработки для ГМКП, применяемых в ГУП ПАТ при эксплуатации автобусов

Из рассматриваемых СМ три марки в графическом инфракрасном спектре имеют одинаковые базовые СМ, по характерным пикам поглощения

инфракрасного света в диапазоне волновых чисел от 1390 до 930 $см^{-1}$. Их графическое описание относится к базовым СМ на нефтяной основе третьей группы по стандарту API 1509-22. К данной группе относятся базовые СМ, полученные из нефти с помощью гидрокрекингового метода очистки с применением катализаторов.

СМ ZF-Ecofluid A Life отличается в графическом спектре от остальных рассматриваемых СМ. Базовое СМ ZF-Ecofluid A Life, согласно его графическому спектру в диапазоне волновых чисел от 1390 до 930 $см^{-1}$, относится к синтетическим полиэфирным СМ пятой группы по стандарту API 1509-22. Важно отметить, что в состав данного СМ входят полиальфаолефины, которые на графике проявляются пиком поглощения более 0,95 единиц в диапазоне волновых чисел от 750 до 700 $см^{-1}$, а также сложные эфиры с пиком поглощения более 1,0 единицы при волновом числе 1735 $см^{-1}$. Эти компоненты способствуют улучшению смазочных свойств благодаря лучшей поляризации молекул к металлическим поверхностям и повышению прочностных характеристик масляной пленки за счет более сильных межмолекулярных связей. СМ, содержащие такие компоненты, менее подвержены деструкции в процессе эксплуатации, что замедляет изменение их состояния по сравнению с другими исследованными СМ.

Таким образом, по компонентному составу и ФХ параметрам можно ожидать, что срок службы СМ ZF-Ecofluid A Life и Shell Spirax S6 ATF A295 до достижения браковочных норм будет больше, чем у СМ Shell Spirax S6 ATF ZM и Rosneft Kinetik ATF III. Однако для определения фактического срока службы и обоснованной периодичности замены СМ в условиях эксплуатации ГМКП городских автобусов необходимо проведение подконтрольных испытаний системы «среда – агрегат – СМ» в реальных условиях.

1.4 Разработка классификатора и схемы факторов отказов ГМКП

При проведении анализа эксплуатационной надёжности ГМКП автобусов был разработан классификатор отказов, возникающих в процессе эксплуатации в условиях города.

Классификатор отказов ГМКП автобусов по видам повреждений представлен в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Классификатор отказов ГМКП автобусов по видам повреждений

Номер шифра/кода	Признак отказа
2100	Гидромеханическая коробка передач
	Механические и электрические повреждения
2101	Посторонний шум и вибрации
2102	Проскальзывание или пробуксовка передач
2103	Заклинивание на одной из передач
2104	Нет режима движения «R» - задний ход или «N» - нейтраль
2105	Высокая температура СМ (перегрев)
2106	Некорректная работа гидрозамедлитель
2107	Нестабильная работа ДВС при активации передачи
2108	Нет движения после активации передачи
2109	Разрегулировка в выборе передач
	Механические повреждения
2110	Течь СМ
2111	Течь охлаждающей жидкости
2112	Состояние СМ и охлаждающей жидкости (эмульсия)
	Электрические повреждения
2113	Некорректная работа спидометра
2114	Самопроизвольное вкл./выкл. передач
2115	Некорректная работа селектора передач

Классификатор позволит оптимизировать процесс обработки заявок на ремонт, возникающих при эксплуатации ГМКП автобусов, для инженерно-технических служб АТП.

Для выявленной наименее надёжной ГМКП (ZF EcoLife 1 6AP1700B) также разработан классификатор дефектов – механических причин полных отказов.

Анализ дефектов – механических причин полных отказов ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B представлен в приложении К.

Классификатор дефектов – механических причин полных отказов ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B представлена в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Классификатор дефектов – механических причин полных отказов ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B

№ п/п	Вид дефекта	Причина
1	Механическое разрушение	1.1. Разрушение кромки ступицы фрикционных муфт «А» и «В»
		1.2. Разрушение крышки корпуса гидроаккумулятора
		1.3. Разрушение зубьев планетарной передачи
		1.4. Разрушение подшипника планетарной передачи
2	Механический износ	2.1. Износ поверхности выходного (приводного) вала
		2.2. Износ внутренней кромки полого вала ступицы фрикционных муфт «А» и «В»
3	Температурные деформации в следствии перегрева	3.1. Локальный перегрев поршня фрикционной муфты «А» и «В»
		3.2. Перегрев полого вала фрикционной муфты «А», по причине заклинивания фрикционных дисков
		3.3. Перегрев полого вала фрикционной муфты «А», по причине проскальзывание фрикционных дисков
4	Химическая коррозия	4.1. Химическая коррозия металла корпуса агрегата в полости циркуляции охлаждающей жидкости бокового теплообменника

На основе логико-аналитического анализа причин возникновения отказов предложено представление взаимосвязи факторов, влияющих на отказы в системе «ГМКП – СМ».

Схема взаимосвязи факторов, влияющих на отказы в системе «ГМКП – СМ» представлена на рисунке 1.17.

Схема демонстрирует сложный причинно-следственный характер отказов, обусловленный как конструктивными особенностями ГМКП, так и многофункциональностью рабочей жидкости, выполняющей одновременно роль СМ, рабочей и охлаждающей жидкости.

В связи с этим актуальным является теоретическое исследование процессов, протекающих в триботехнической системе «агрегат – смазочный материал», влияющих на состав, структуру и свойства циркулирующего СМ, что позволит оценивать и прогнозировать эксплуатационную надёжность агрегата при эксплуатации.

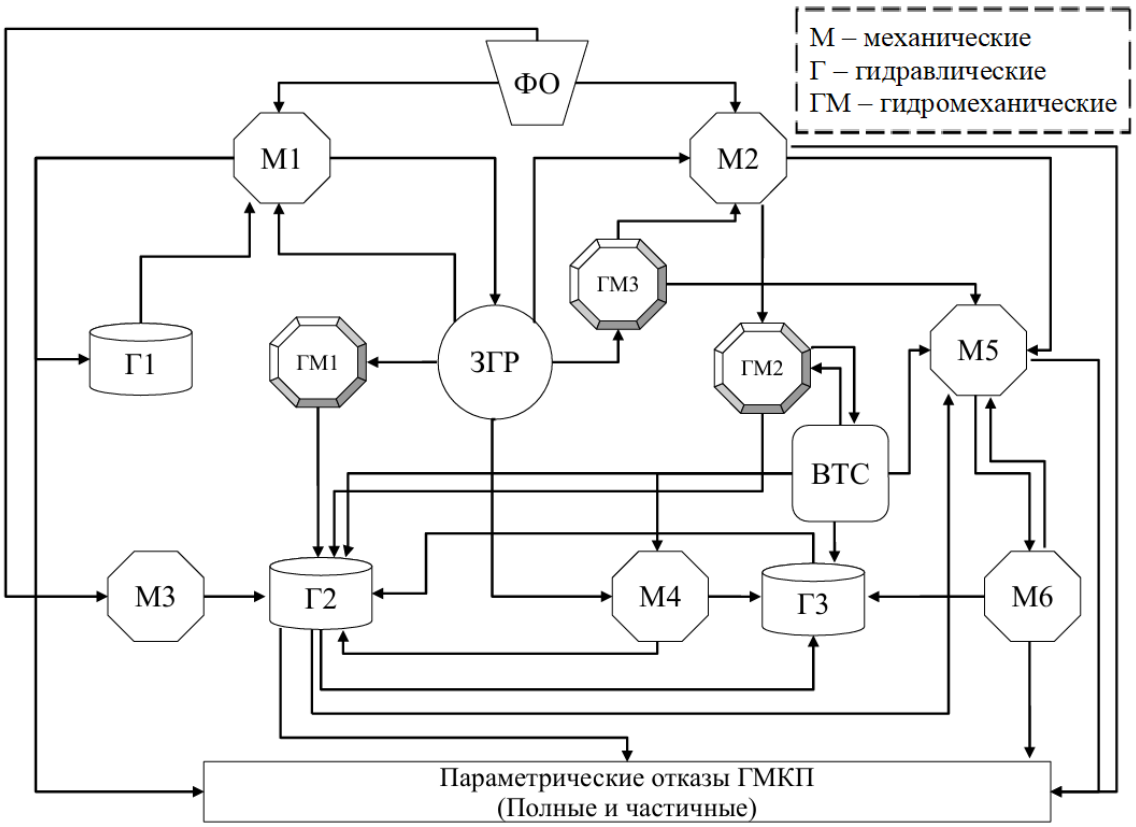


Рисунок 1.17 – Схема взаимосвязи факторов, влияющих на отказы в системе «ГМКП – СМ»

М1 - износ, задиры и разрушения зубьев, втулок и подшипников шестерен; М2 – износ, термо-фрикционное спекание и микроконтактное сваривание металлокерамического фрикционного материала дисков сцепления и тормозов; М3 – износ посадочных отверстий клапанов гидроблока; М4 – износ и химическая деструкция резинотехнических материалов; М5 – резкое-рывковое (удары) включение или отсутствие передач; М6 – нарушение целостности (трещинообразование) корпуса ГМКП; ФО - нарушение фильтрации и очистки СМ; Г1 – накопление и осадкообразование загрязняющих элементов в каналах и трубопроводах системы смазки; Г2 - изменение (падение) давления СМ в системе магистралей; Г3 - утечки СМ из-за нарушения герметичности; ГМ1 - заклинивание и аккумуляция осадков в зонах клапанов и дроссельных элементов; ГМ2 - нарушение теплового режима работы (перегрев СМ); ГМ3 - аккумуляция твердых осадков в полости фрикционных муфт; ЗГР – повышение концентрации элементами загрязнения СМ (частицами дорожного происхождения, продуктами износа, окисления, сульфирования и сульфатирования); ВТС - отклонение значений от нормы и критического предела показателей вязкостно-температурных свойства и прокачиваемости (кинематическая и динамическая вязкость, плотность, индекс вязкости и др.)

Выводы по главе

1. Выполнен обзор научных работ по рабочим процессам, конструкциям ГМКП и свойствам смазочных материалов. Подтверждена необходимость разработки или усовершенствования метода обоснования периодичности ТО (замены СМ и фильтрующего элемента) для повышения долговечности ГМКП автобусов, поскольку опыт АТП свидетельствует об отрицательной динамике.

2. Анализ статистических данных ГУП ПАТ по эксплуатационной надёжности ГМКП показал: агрегаты трансмиссии автобусов ОБК занимают 3-е место по наименьшей надёжности. Наименее надёжная модель — ZF EcoLife 1 6AP1700B с фактическим ресурсом до первого ремонта 254 000 км (33% от регламентированного производителем агрегата). Основные признаки отказов по видам повреждений: пробуксовка передач, полное или выборочное отсутствие движения, разрегулировка передач и течь СМ. При дефектовке наиболее частые причины отказов – износ фрикционных дисков муфты сцепления и неудовлетворительное визуальное состояние СМ.

3. Определён перечень основных ФХ параметров СМ для ГМКП, рассмотрены их характеристики и методы испытаний. По данным ГУП ПАТ, для 18 моделей ГМКП используются три марки СМ с регламентированной периодичностью ТО от 60 до 240 тыс. км. Проведён сравнительный анализ СМ. Обоснована необходимость проведения подконтрольных испытаний системы «среда – агрегат – СМ».

4. Разработаны классификатор отказов ГМКП по видам повреждений (механические, электрические) и классификатор механических причин полных отказов (разрушения, износ, температурные деформации, химическая коррозия). Построена схема взаимосвязи факторов отказов в системе «ГМКП – СМ», демонстрирующая сложный причинно-следственный характер отказов, обусловленный конструктивными особенностями агрегата и многофункциональностью рабочей жидкости.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ТРИБОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ СРЕДА – АГРЕГАТ – СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

Настоящая глава посвящена рассмотрению теоретических аспектов использования СМ как информационного источника для рационализации мероприятий, направленных на повышение долговечности элементов, узлов и механизмов эксплуатирующийся в триботехнической системе типа «среда – агрегат – смазочный материал».

Процессы фрикционного взаимодействия, износа и смазки агрегатов, изучаемые посредством лабораторных исследований характеристик СМ, относятся к области науки трибологии, включающей трибомониторинг, триботехнику и трибоматериаловедение [3, 35–44], а также химмотологии СМ и других смежных областей науки [45–52]. Таким образом, решение проблемы повышения показателей эксплуатационной надежности и эффективности эксплуатации агрегатов АТС на основе рационализации применения СМ должно основываться на достижениях указанных научных областей.

Теоретический анализ процессов изнашивания трибосопряжений при жидкостном трении, осадкообразования продуктов износа и накоплении частиц загрязнений на микроуровне, что в свою очередь отражается на параметрах макроуровня, представляет наукоемкие трудности в исследовании. Так как, помимо извлечения их значений, необходимо определять корреляционную связь между ними, что позволит разработать новые подходы к изучению данных процессов. Поэтому выдвигаются определенные гипотезы относительно механизма развития процессов, которые впоследствии требуют экспериментальной проверки и обоснования для последующей разработки технико-экономических решений, способствующих повышению безотказности и долговечности рассматриваемой системы.

Практическое исследование закономерностей протекающих процессов и оценку работоспособного состояния исследуемой системы предлагается проводить на основании диагностической информации, заключенной в параметрах работающего СМ (ПРСМ). Известно, что текущие значения параметров СМ, служащие количественной мерой такой информации, определяются комплексом ФХ и -механических испытаний проб СМ. ПРСМ характеризуют либо одно из функциональных свойств СМ (исходных и приобретённых), либо одно из приобретенных им новых состояний, либо изменение его структуры в процессе эксплуатации.

Экспериментальные данные, полученные в ходе лабораторных, стендовых и натурных (эксплуатационных) испытаний, позволяют сформировать обширную базу данных, отражающую текущее техническое состояние контролируемых агрегатов, динамику процессов износа, образование отложений продуктов износа и изменение основных параметров СМ, влияющих на общий срок службы технических элементов и системы в целом.

2.1 Теоретическая классификация информации о работоспособности системы «среда – агрегат – смазочный материал»

Предлагаемая классификация информации, служит для изучения системы типа «среда – агрегат – СМ», разработана на основе анализа профильной научной литературы и эмпирических исследований в ходе написания диссертационной работы. Данная систематизация включает широкий спектр данных, полученных из реальных условий эксплуатации АТС, нормативно-технической документации и специализированной справочной литературы.

Классификация информации заключенной в СМ о работоспособности системы «среда – агрегат – СМ» представлена на рисунке 2.1.

Информационная структура классификации делится по следующим критериям [53–58]:

1. Источник информации:

– Данные из сферы и опыта эксплуатации АТС,

– Нормативно-техническая документация,

– Специализированная справочная литература.

– О техническом состоянии агрегата, узла, механизма

– О состоянии работающего/циркулирующего СМ.

2. Типы протекающих процессов:

– Процессы, протекающие непосредственно на поверхностях трибосопряжений;

– Изменения эксплуатационных свойств циркулирующего СМ;

– Приобретение СМ новых свойств вследствие эксплуатации;

3. Методы получения и декодирования информации:

– Стандартные и нестандартные методы исследований физического и химического состояния СМ

– Изучение физических и химических явлений, возникающих в результате контакта поверхностей.

4. Характеристики изменений СМ:

– Исходные свойства СМ,

– Приобретённые характеристики вследствие эксплуатации,

– Структурные и агрегативные изменения СМ, обусловленные присутствием примесей, воды, топлива и продуктов горения.

Изменения ключевых параметров СМ и динамики накопления отложений тесно связаны с надежностью и эффективностью работы агрегатов АТС. Основная причина большинства нарушений и отказов заключается в воздействии факторов: окислительных и коррозионных процессов; механических нагрузок; процессов изнашивания [32, 59, 60].

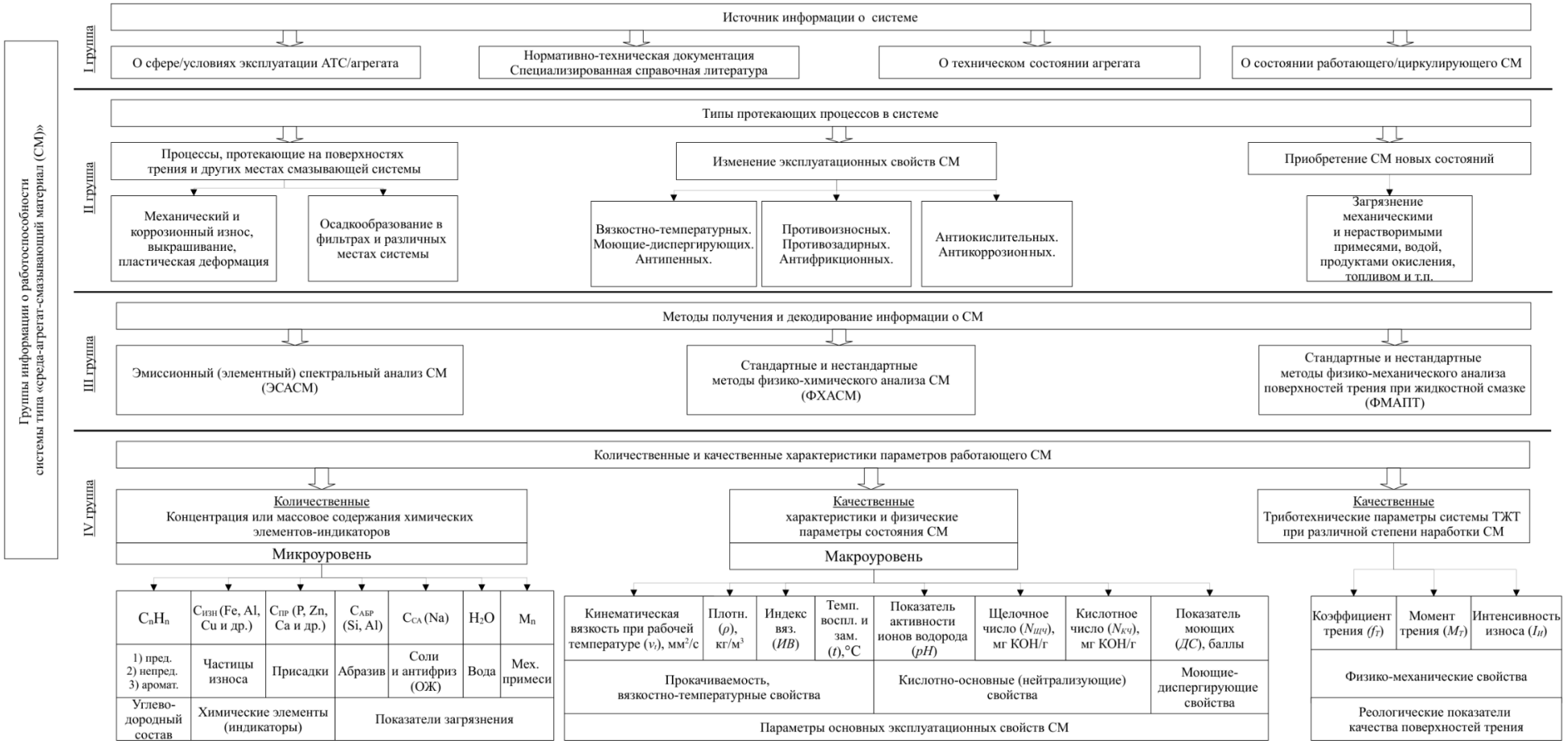


Рисунок 2.1. – Классификация информации заключенной в СМ о работоспособности системы «среда – агрегат – СМ»

Эти воздействия неизбежно ведут к изменениям ФХ параметров СМ, проявляющихся в снижении защитных свойств и накоплении вредных примесей. Важнейшим инструментом выявления изменений служат методы ФХ анализа проб СМ и отложений, позволяющие оперативно фиксировать отрицательные изменения [32, 59, 60].

Однако сложность множественных взаимодействий и большого объема информации существенно затрудняет создание формализованных моделей, позволяющих объективно оценивать влияние каждого фактора на надежность агрегатов. Несмотря на значительный прогресс в исследовании трибосистем, до сих пор отсутствует четкое понимание зависимости ПРСМ и степенью изнашиваемости деталей и узлов агрегатов АТС.

Проблема состоит в необходимости учета многочисленных переменных величин, среди которых:

– степень наработки агрегата АТС;

– тип применяемого СМ и условия его хранения;

– качество применяемых эксплуатационных жидкостей и топлива;

– конструктивные особенности агрегата АТС.

Для эффективного анализа подобной сложной многофакторной системы необходимо применение методов математического, логического и структурного моделирования. Однако взаимосвязь показателей разных уровней классификации и их влияние на надежность агрегатов АТС ранее не была формализована моделями. Такие связи либо принимались априорно, либо обосновывались гипотезами без строгого математического описания. В частности, отсутствуют модели взаимосвязи триботехнических параметров и ФХ параметров СМ (например, интенсивности изнашивания и кинематической вязкости) в системах ГМКП городских автобусов. Поэтому в работе предпринята попытка устранения этого пробела методами соответствующих структурных, математических и логических моделей, основанных на информации, заключенной в ПРСМ.

Разработанная классификация информации позволяет проработать процесс организации исследовательских мероприятий, направленные на выявление основных факторов, снижающих эксплуатационную надежность агрегатов АТС, и разрабатывать рекомендации по решению данной проблемы.

В этой связи далее рассматриваются механизмы процессов изнашивания трущихся сопряжений, а также образования осадка твердых частиц в системе смазки. Для этого были исследованы универсальные подходы к моделированию процессов, протекающих в агрегатах АТС с замкнутыми системами смазки.

2.2 Теоретические вопросы исследования процессов изнашивания и образования твердых осадков в системе «среда – агрегат – смазочный материал»

Исследование процессов изнашивания и образования твёрдых осадков в технических системах представляет собой комплексный научный подход, направленный на изучение закономерностей изменения состояния поверхности контактирующих элементов узлов и механизмов агрегатов в ходе их эксплуатации. Согласно общепринятым представлениям, полный цикл износа (R_{III}) элементов системы трибосопряжения принято подразделять на три этапа, каждый из которых характеризуется специфическими особенностями и механизмами разрушения материала.

Согласно классической теории В.Ф. Лоренца, динамика изнашивания поверхностей трущихся деталей включает три последовательных периода в ходе эксплуатации [61]:

(*I*) Период приработки (начальная стадия) – данный этап сопровождается первоначальной притиркой сопряжённых поверхностей, устранением шероховатостей и дефектов, формированием оптимального

контакта между деталями. По завершению периода создаются предпосылки для дальнейшего устойчивого функционирования системы.

(*II*) Период нормального износа – данный этап характеризуется постепенным увеличением степени износа с относительно низкой и стабильной изнашиваемостью материала. Внешние факторы оказывают минимальное воздействие на состояние поверхностного слоя для функционирования системы.

(*III*) Период интенсивного износа (форсированная/аварийная заключительная стадия) – данный этап наступает при достижении предельного уровня износа или нарушении режимов эксплуатации. Динамика изнашиваемости увеличивается многократно, существенно сокращается срок службы деталей, возрастает вероятность полного или частичного отказа агрегата.

Общая формула расчета полного износа $R_{ПИ}$, учитывает суммарную потерю толщины слоя металла на каждом из этапов и может быть представлена следующим образом [61]:

$$R_{ПИ} = R_{(1)} + R_{(2)} + R_{(3)}, \quad (2.1)$$

где $R_{(1)}$ – ресурс периода приработки;

$R_{(2)}$ – ресурс периода нормального износа;

$R_{(3)}$ – ресурс периода интенсивного износа.

Исходя из этого, предельную массу металла, $\sum M$, отделенного от трущихся поверхностей и накопившегося в системе смазки до момента возникновения параметра отказа агрегата, можно определить по следующей формуле [61]:

$$\sum M = M_{(1)} + M_{(2)} + M_{(3)}, \quad (2.2)$$

где $M_{(1)}$ – масса металла, отделенного в период приработки;

$M_{(2)}$ – масса металла, отделенного в период нормального износа;

$M_{(3)}$ – масса металла, отделенного в период интенсивного износа.

Принимая во внимание различную интенсивность изнашивания в каждом периоде длительности эксплуатации, общая предельная масса отделенного до отказа металла может быть выражена следующей формулой:

$$\sum M = I_{И(1)} \cdot t_{Э(1)} + I_{И(2)} \cdot (t_{Э(2)} - t_{Э(1)}) + I_{И(3)} \cdot (t_{Э(3)} - t_{Э(2)}), \quad (2.3)$$

где $I_{И(1)}$, $I_{И(2)}$, $I_{И(3)}$ – интенсивности изнашивания трибосопряженияв периоды приработки, нормального и интенсивного износа;

$t_{Э(1)}, t_{Э(2)}, t_{Э(3)}$ – продолжительность каждого из указанных этапов эксплуатации (наработки).

Зависимость износа (потери массы - M) элемента пары трибосопряжения от продолжительности эксплуатации (наработки) представлена в Приложении Л [61, 62, 63].

Процессы изнашивания (абразивного и коррозионного), а также образование осадков продуктов износа, влияющие на работоспособное состояние агрегатов, эффективно формализуется и декодируются с использованием ПРСМ, получаемых лабораторными методами.

Однако в практической деятельности при получении информации о работоспособности агрегатов целесообразно проводить дифференцированную оценку их износа, выделяя конкретные детали (элементы) износа отдельных сопряжений. Важную роль играет установление взаимосвязи между химическим составом (накоплением концентрации химических элементов-индикаторов) циркулирующего СМ, определенных методом (оптико-эмиссионного спектрального анализа СМ), и наработкой до наступления полного или частичного отказа. Таким образом, для выявления источника изнашивания может быть применен сбор и обработка статистической информации однотипных агрегатов методом ранжирования и линейного моделирования [64, 65, 66].

Ранжирование факторов, оказывающих влияние на разные виды изнашивания или износа, может быть организовано через оценку критериев степени абразивного и коррозионного изнашивания деталей агрегата критических по надежности для его дальнейшей эксплуатации.

В данном разделе пока лишь отметим, что к числу основных элементов, определяющих эксплуатационную надежность, например, агрегата трансмиссии автобуса – ГМКП, относятся детали зубчатых колес, подшипников валов, муфт сцепления или тормозов, а также элементы гидротрансформатора. Исследование износа таких наиболее критических компонентов позволяет рассчитать прогнозные значения показателей безотказности и долговечности как отдельно взятых деталей, так и всей системы в целом.

2.3 Закономерности процессов изнашивания трущихся сопряжений при эксплуатации гидромеханических коробок передач

Многочисленные исследования надежности транспортных ГМКП, опубликованные в профильной литературе [1, 2, 14, 67–72], показывают, что снижение их долговечности и безотказности происходит преимущественно в результате механического (абразивного) и коррозионного изнашивания деталей фрикционных муфт сцепления (фрикционных металлокерамических дисков, гидроцилиндрических поршней), блока гидроклапанов и подшипников валов. Ниже предложены показатели и выполнено математическое моделирование процессов механического (абразивного) и коррозионного изнашивания применительно к оценке износа исследуемого агрегата трансмиссии АТС.

В работах [35, 73, 74, 75] установлено, что снижение работоспособного состояния ГМКП АТС определяется главным образом степенью абразивного и коррозионного изнашивания трущихся деталей. У механических передач трансмиссии АТС этот вид изнашивания существенно усиливается под

влиянием динамического фактора, оцениваемого величиной углового зазора (люфта) в сопряжениях и характеризующего динамическую загруженность передач.

Абразивное изнашивание обусловлено попаданием дорожных загрязнений (пыли, грязи), содержащих двуокись кремния (SiO_2) - ключевого компонента минеральных-абразивных частиц, в систему смазки агрегата, что вызывает интенсивный механический износ трущихся пар под нагрузкой.

Коррозионное изнашивание возникает вследствие воздействия кислотных продуктов органического происхождения, формирующихся в системе смазки при эксплуатации. Это сопровождается ростом кислотного числа СМ ГМКП, которая характеризует работу активных компонентов нейтрализующих антиокислительных присадок. Детали трансмиссионных агрегатов менее подвержены коррозии, однако отсутствие или минимальное наличие щелочных компонентов в СМ способствует накоплению кислот.

Низкая антикоррозионная активность СМ, определяемая по снижению показателей кислотно-основных свойств ($pH, N_{ЩЧ}, N_{КЧ}$), оказывает отрицательное воздействие на конструкционные металлические материалы поверхностей деталей агрегатов (черные металлы - сталь и чугун и особенно цветные металлы - бронзу и латунь) за счет коррозионного или электрокоррозионного воздействия.

Известно [3, 4, 5, 45, 48], что коррозионные свойства трансмиссионных СМ, не содержащих щелочные (нейтрализующие) присадки, зависят от содержания в них органических кислот и от углеводородного группового состава базового СМ, причем особое внимание уделяется содержанию нафтеновых углеводородов.

Углеводородный групповой состав оказывает значительное влияние на характер окисления таких СМ, который, в свою очередь, зависит от температурных рабочих режимов триботехнической системы. Следовательно,

коррозионные свойства работающих трансмиссионных СМ (так же, как и моторных) значительно отличаются от СМ без наработки.

Большаковым Г.Ф. [45] установлено, что в работающем СМ для ГМКП уже в первые часы работы появляются продукты окисления, часть из которых являются коррозионно-агрессивными. При попадании в СМ воды, что наблюдается при нарушении герметичности картера агрегата или достижении конденсационной температуры, механизм протекания процесса коррозии становится электрохимическим.

Поэтому для оценки абразивного и коррозионного износа в работе предложены сравнительные показатели, которые основываются на результатах исследования СМ методом эмиссионного (элементного) спектрального анализа СМ.

Показатель степени абразивного изнашивания ($П_{АИ}$), учитывает влияние загрязняющих частиц дорожного происхождения, поступающих в систему смазки агрегата, рассчитывается по формуле [35, 36, 62]:

$$П_{АИ} = \frac{C_{me\ i}}{C_{Si}}, \tag{2.4}$$

где $C_{me\ i}$ – концентрации *i*-го химического элемента металла - индикатора износа, мг/кг;

C_{Si} – концентрации кремния (Si), как элемента-индикатора загрязнения дорожного происхождения (пыль, грязь), мг/кг.

Показатель степени коррозионного изнашивания ($П_{КИ}$), учитывает влияние накопившихся кислот в СМ при эксплуатации агрегата, рассчитывается по формуле [35, 36, 62]:

$$П_{КИ} = \frac{C_{me\ i}}{N_{КЧ}}\ , \tag{2.5}$$

где $N_{КЧ}$ – общее кислотное число, мг KOH/г.

Интенсификация поступления кремния в смазочную систему агрегата, как индикатора загрязнения дорожного происхождения имеет высокую

корреляционную связь с накоплением и содержанием концентрации элементов-индикаторов механического износа, что свидетельствует о прободении абразивного характера механизма изнашивания трущихся пар трения. Одновременно с этим, на активизацию коррозионных процессов внутри агрегате указывает значительный рост КЧ и показателя активности ионов водорода (pH), которые по наблюдениям ученых стабилизируются при достижении определенного их уровня в СМ в процессе эксплуатации.

Отметим, что применение в работе метода оптико-эмиссионного спектрального анализа СМ, определяющего в каждой пробе СМ содержание всех химических элементов-индикаторов частиц износа деталей одновременно, позволяет их локализовать с учетом источника поступления, связанного, в свою очередь, с химическим составом конструкционных материалов (сталь, чугун, бронза, алюминий и др.). В качестве математического аппарата, позволяющего производить дифференциальную оценку процесса изнашивания по отдельным узлам и группам деталей, можно успешно использовать метод линейного программирования [55, 65, 76].

Следовательно, общий процесс изнашивания деталей АТС можно представить как интенсивность накопления индикаторных элементов износа в смазочной системе.

Чтобы оценить картину изнашивания сложных агрегатов, таких как ГМКП, предлагается применять уравнение баланса для расчета массы *i*-го химического элемента (M_i, кг), накопившегося в смазочной системе на момент *j*-го отбора пробы, по формуле [10, 45, 55, 61]:

$$M_i = \mathrm{f}\,[(C_i \cdot V_{CM} \cdot \rho_{CM} + \sum_{i}^{\partial}(C_i + C_{i-1}) \cdot (\omega_У \cdot \rho_{CM} \cdot \Delta t_i \cdot f_У) + \\ + \sum_{j}^{\delta}(C_{MO_i} \cdot M_{MO_i}) + (C_i \cdot V_{CM} \cdot \rho_{CM} \cdot f_{OC})] \qquad (2.6)$$

где C_i – текущее значения химического элемента-индикатора в работающем СМ, мг/кг (% мас.);

C_{i-1} – предыдущее значения химического элемента-индикатора в работающем СМ, мг/кг (% мас.);

∂ – порядковый номер отбираемой пробы;

δ – количество фильтрующих элементов в масляной системе;

C_{MO_i} – концентрация элемента-индикатора в отложении СМ очистителя *i*-го отбора, мг/кг (% мас.);

V_{CM} – объем СМ, циркулирующего в системе смазки, л;

M_{MO_i} – масса отложения, задержанная очистителем СМ на момент *i*-го отбора пробы отложения, кг;

ρ_{CM} – плотность СМ при 15 °С, кг/м³, (г/л);

$\omega_У$ – скорость угара СМ, л/ч;

$f_У$ – коэффициент уноса (угара) химического элемента;

f_{OC} – коэффициент осадкообразования;

Δt_i – продолжительность работы агрегата между отборами проб СМ, ч.

Отметим, что третье слагаемое в формуле (2.5) учитывает общее содержание *i*-го химического элемента в системе очистки СМ агрегата.

Логическим завершением исследования долговечности (ресурса) любых пар трибосопряжения в узлах и агрегатах является выявление причин изнашивания, определяемых с использованием факторного регрессионного анализа. Оценку этих причин наиболее эффективно производить путем построения математических моделей, позволяющих описать зависимость интенсивности изнашивания основных конструктивных материалов деталей пар трения ($I_{ИС_{me\ i}}$) характеризующаяся ростом концентрации накапливаемых элементов-индикаторов износа вследствие протекающих механико-абразивных и коррозионно-кислотных процессов, а также динамическими изменениями макропараметров СМ в процессе эксплуатации, то есть от наработки (*L*).

Исходя из этого, для обоснования данной теоретической зависимости разработана полиномиальная математическая модель, адекватно отображающая интенсивность изнашивания основных трущихся сопряжений агрегата трансмиссии АТС с учетом влияния как абразивного, так и коррозионно-кислотного макропараметра и динамического фактора в процессе эксплуатации. Модель имеет следующий вид:

- для передач зубчатых зацеплений:

$$I_{ИС_{me\ i}} = \mathrm{f}\,(b_0 + \ldots + b_n \cdot C_{Si}^n + b_{n-1} \cdot C_{Si}^{n-1} + \ldots + b_m \cdot \Delta\varphi^m + \\ + b_{m-1} \cdot \Delta\varphi^{m-1} + \ldots + b_p \cdot \nu_t^p + b_{p-1} \cdot \nu_t^{p-1} + \ldots + b_e \cdot L^e + \\ + b_{e-1} \cdot L^{e-1}) \qquad (2.7)$$

- для фрикционных муфт гидромеханических передач:

$$I_{ИС_{me\ i}} = \mathrm{f}\,(b_0 + \ldots + b_n \cdot C_{Si}^n + b_{n-1} \cdot C_{Si}^{n-1} + \ldots + b_m \cdot N_{КЧ}^m + \\ + b_{m-1} \cdot N_{КЧ}^{m-1} + \ldots + b_p \cdot \nu_t^p + b_{p-1} \cdot \nu_t^{p-1} + \ldots + b_e \cdot L^e + \\ + b_{e-1} \cdot L^{e-1}) \qquad (2.8)$$

где C_{Si} – концентрации в СМ элемента-индикатора загрязнения дорожного происхождения (абразива) – кремния (Si), мг/кг.

ν_t – кинематическая вязкость при температуре (t°C), мм^2/с;

$\Delta\varphi$ – суммарный угловой люфт в сопряжении, угловые градусы (°);

L – наработка СМ, км;

$N_{КЧ}$ – общее кислотное число, мг KOH/г;

$b_0, \ldots b_n, b_{n-1} \ldots b_m, b_{m-1}, \ldots b_p, b_{p-1} \ldots b_e, b_{e-1} \ldots$ – коэффициенты полиномиальной модели.

Данная модель применима для однотипных групп агрегатов.

В обобщенном расширенном виде для ГМКП модель (2.8) можно представить в следующем виде:

$$I_{ИС_{me\ i}} = \text{f}\,(b_0 + ... + b_n \cdot C_{Si}^n + b_{n-1} \cdot C_{Si}^{n-1} + ... + b_m \cdot \Delta\varphi^m +$$
$$+ b_{m-1} \cdot \Delta\varphi^{m-1} + ... + b_z \cdot N_{KЧ}^z + b_{z-1} \cdot N_{KЧ}^{z-1} + ... + b_p \cdot \nu_t^p + \quad , \quad (2.9)$$
$$+ b_{p-1} \cdot \nu_t^{p-1} + ... + b_e \cdot L^e + b_{e-1} \cdot L^{e-1} + ... + b_q \cdot F^q + b_{q-1} \cdot F^{q-1})$$

где F – возможные неучтенные факторы (степень загрузки автобуса пассажирами, работа на подъёмах, температура воздуха, время работы системы без остановки и др.);

n, m, p, q – показатель степени фактора.

Таким образом, предложена полиномиальная математическая модель, которая может быть использована для описания закономерностей накопления элементов абразивно-коррозионного изнашивания при варьировании динамических факторов при эксплуатации различных конструкционных типов ГМКП.

Также для практических расчётов предлагается применять упрощённую математическую модель (2.8), по следующей формуле:

$$I_{ИС_{me\ i}} = \frac{C_{me\ i}}{L}, \quad (2.10)$$

где $I_{ИС_{me\ i}}$ – интенсивность изнашивания основных конструктивных материалов деталей пар трения, характеризующая скорость накопления i-го химического элемента-индикатора в СМ, мг/кг·км.

$C_{me\ i}$ - содержание концентрации в СМ i-го химического элемента-индикатора износа материалов пар трения, мг/кг.

Установленные зависимости позволяют выявлять причины интенсификации изнашивания и прогнозировать изменение ключевых параметров СМ в процессе эксплуатации. Это создаёт основу для дальнейших исследований влияния внутренних и внешних факторов на долговечность и безотказность агрегатов.

2.4 Закономерности изменения параметров работающего смазочного материала при эксплуатации агрегатов и их связь с работоспособностью системы «агрегат – смазочный материал»

Проведение практических исследований закономерностей протекающих процессов и оценки работоспособного состояния системы «среда – агрегат – смазочный материал» предлагается осуществлять посредством анализа диагностических данных, содержащихся в параметрах работающего смазочного материала (ПРСМ). Значения этих параметров получают путем комплекса ФХ испытаний проб СМ. ПРСМ отражают функциональное состояние материала, структурные преобразования и свойства (исходные и приобретенные) в ходе эксплуатации.

В профильной литературе [5, 77, 78, 79] изменение свойств СМ в процессе эксплуатации часто называют «старением». Однако, с позиций анализа ФХ параметров более информативно рассматривать при мониторинге динамику конкретных показателей: кинематической вязкости, кислотного числа, содержания активных элементов присадок, а также накопления примесей и загрязнений.

В первую очередь для оценки изменений ПРСМ предлагается их разграничить как упоминалось ранее на микроуровень (изменения химических параметров характеризующих углеводородный и химический состав СМ), на макроуровень (изменение ФХ параметров, таких как кинематическая вязкость, плотность, кислотность, коррозионные и температурные свойства и др.), а также триботехнический уровень при различной степени наработки СМ (интенсивность изнашивания, коэффициент трения, момент трения и др.).

Для исследования микроуровня - влияния группового углеводородного состава на работоспособность и характеристики СМ важно установить долевое или процентное содержание алканов, алкенов, алкинов и ароматических углеводородов. Предлагается способ приблизительного расчета содержания указанных классов углеводородов, базирующийся на

анализе соотношений между различными типами углеводородов в составе базовой основы СМ.

Состав углеводородов в СМ в процессе эксплуатации претерпевает изменения вследствие химических реакций на его уровне. Установлено, что ключевым процессом, негативно влияющим на структуру и функциональные свойства СМ, является реакция сульфирования и сульфатирования, приводящая к образованию серной кислоты (H_2SO_4), которая ускоряет отрицательные количественные и качественные изменения.

Теоретически обосновать реакции сульфирования и сульфатирования возможно путём моделирования химической реакции углеводородов с серной кислотой, образующейся при окислительных процессах в условиях повышенных температур и присутствия кислорода. Согласно литературным данным [80–83], алканы - предельные углеводороды практически не вступают в реакцию с серной кислотой благодаря насыщенной структуре, тогда как алкены и алкины - ненасыщенные углеводороды взаимодействуют с образованием сульфонатных кислот.

Модель химического процесса сульфатирования алкенов входе эксплуатации СМ в агрегате АТС представлена на рисунке 2.2 [80–83].

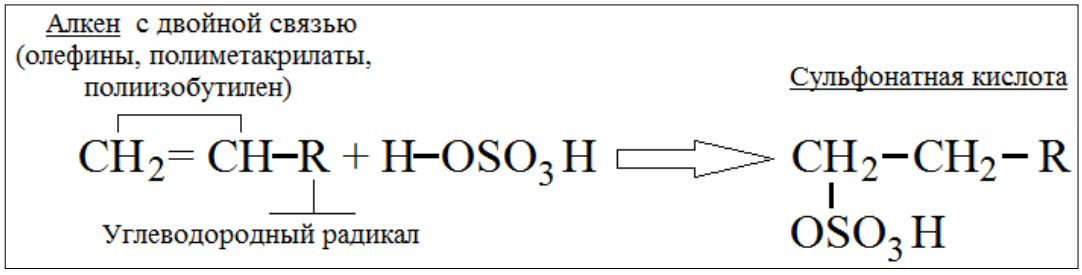


Рисунок 2.2 – Модель химического процесса сульфатирования алкенов входе эксплуатации СМ в агрегате АТС

Представленная модель описывает химическое взаимодействие алкенов входящих в рецептуру СМ для ГМКП, с серной кислотой., результатом которого становится образование сульфоната.

Присоединяемая к алкену сульфонатная группа (OSO_3H) характеризуется наличием одинарной связи между атомами кислорода и серы, а также двойной связи между серой и вторым атомом кислорода, связанным с водородом. Эта группа обладает кислотными свойствами и способна подвергаться гидролизу (распаду в воде), образуя сульфонатную кислоту.

Концентрация образовавшейся кислоты отрицательно сказывается на работе СМ, вызывая разрушение-истощение активных элементов присадок с формированием гидроксида калия (KOH), что способствует коррозионному изнашиванию металлических поверхностей деталей агрегата и снижению вязкостных и смазочных свойств СМ.

Таким образом, подтвержден факт образования сульфонатной кислоты в результате реакции алкенов с серной кислотой, которая инициирует негативные последствия для стабильной работоспособности СМ в агрегатах АТС.

Ниже рассмотрим взаимодействие ароматических углеводородов с серной кислотой. Ароматических углеводороды подвержены сульфированию серной кислотой благодаря их повышенной реакционной активности, связанной с особенностями стабильной молекулярной структуры (плоского кольца с делокализованными – распространенными по всей молекуле электронами) [80–84].

Модель химического процесса сульфирования ароматического углеводорода (бензола) входе эксплуатации СМ в агрегате АТС представлена на рисунке 2.3 [80–84].

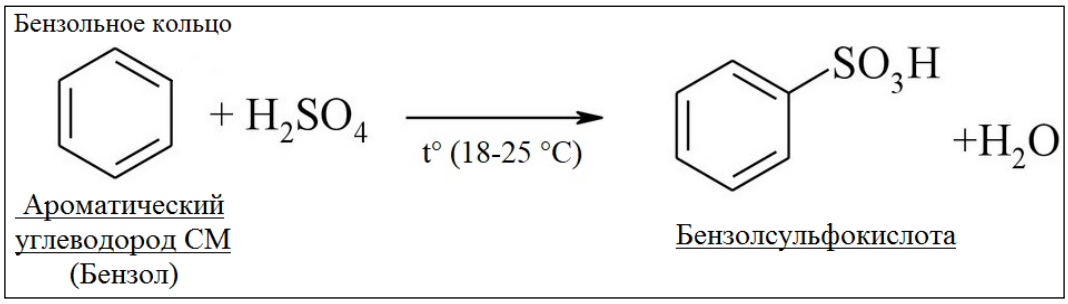


Рисунок 2.3 – Модель химического процесса сульфирования ароматического углеводорода (бензола) входе эксплуатации СМ в агрегате АТС

Представленная модель описывает химическую реакцию сульфирования ароматических углеводородов, используемых в производстве трансмиссионных и моторных СМ, в том числе и СМ для ГМКП, на примере бензола (C_6H_6), также применяется и толуол ($C_6H_5CH_3$) или нафталин ($C_{10}H_8$).

Результатом реакции является образование бензолсульфоновой кислоты ($C_6H_5SO_3H$) и воды (H_2O), что способствует усилению коррозионных процессов изнашивания, уменьшению вязкости и формированию осадков в элементах агрегата АТС.

Объем не вступивших в реакцию углеводородов в СМ после сульфатирования и сульфирования служит индикатором суммарного содержания групп углеводородного состава, который может позволить отследить динамику изменений углеводородов состава в процессе эксплуатации.

Исходя из изложенного, предложено ввести относительный показатель оценки изменений углеводородного состава СМ – показатель углеводородного состава, учитывающий количество непреобразованных (исходных) углеводородов по формуле:

$$CH_M = \frac{ННУ + АУ}{НПУ} \qquad (2.11)$$

где CH_M - показатель углеводородного состава;

$ННУ$ - содержание объемной доли ненасыщенных непредельных углеводородов (алкены: C_nH_{2n} и алкины: C_nH_{2n-2}), %;

$НПУ$ - содержание объемной доли насыщенных предельных углеводородов (алканы: C_nH_{2n+2}), %;

$АУ$ - содержание объемной доли ароматических углеводородов, %.

Предполагается наличие корреляционной связи между микроскопическими (углеводородный и химический состав) и макроскопическими (вязкость, кислотное число) параметрами СМ.

Лабораторные эксперименты подтвердили, что предложенный относительный показатель углеводородного состава характеризует истощение эксплуатационных свойств СМ в процессе эксплуатации. Для его определения применялись: высокоэффективная жидкостная хроматография по стандарту ASTM D7419-24 (для насыщенных и ароматических углеводородов), адсорбционная хроматография с флуоресцентным индикатором по ГОСТ 31872-2012 (для ненасыщенных углеводородов).

Результаты исследований (глава 3) показали, что продукты окисления, сульфирования и сульфатации СМ приводят к изменению его внешнего вида, вязкости, кислотности и накоплению осадков [3, 4, 5, 45]. Наиболее подвержены этим изменениям насыщенные углеводороды (алканы, парафины) и нафтены, поскольку с увеличением молекулярной массы и количества боковых цепей повышается их склонность к окислению и сульфированию [5, 45, 48]. Окисление парафиновых и нафтеновых углеводородов сопровождается образованием кислотных, коррозионно-агрессивных продуктов [45, 79]. Сульфированные и сульфатированные ароматические углеводороды образуют нерастворимые смолистые и асфальтеновые фракции, загрязняющие гидравлические системы агрегатов АТС при длительном воздействии высоких температур [5, 48, 80].

Изменение группового углеводородного состава СМ – Shell Spirax S6 ATF ZM в процессе эксплуатации представлено в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Изменение группового углеводородного состава СМ – Shell Spirax S6 ATF ZM в процессе эксплуатации

Наработка смазочного материала ГМКП	Метод испытаний	Относительный показатель углеводородного состава
0 км	ASTM D7419-24 (*НПУ и АУ*) ГОСТ 31872-2012 (*ННУ*)	0,41
45 000 км		0,54
90 000 км		0,75
135 000 км		0,83
180 000 км		0,94

Анализ данных таблицы 2.1, полученных в аккредитованной лаборатории для исследуемого СМ (Shell Spirax S6 ATF ZM), показывает, что в процессе длительной эксплуатации ГМКП наблюдается тенденция к увеличению содержания предельных углеводородов, что отражается ростом относительного показателя углеводородного состава до значений, близких к единице. Данный эффект свидетельствует о необратимом комплексном изменении параметров работающего СМ.

Можно предположить, что нарушения первоначальной структуры углеводородной базы СМ возникают вследствие внутренних перестроек органической матрицы базового СМ, включая разрыв химических связей. В ходе исследований также установлено, что этот процесс сопровождается полимеризацией, что наглядно подтверждается микрофотографиями проб СМ (см. главу 3), полученными методом оптической микроскопии в тёмном поле с увеличением (×700).

Теоретическое исследование основано на допущении, что наработка и срок службы СМ в агрегатах АТС определяют количественные и качественные изменения его химического и группового углеводородного состава. Согласно классическому принципу «состав – структура – свойства», оценка этих изменений должна проводиться на макро-, микро- и триботехническом уровнях.

Микрофотографии оптической микроскопии проб СМ – Shell Spirax S6 ATF ZM представлены на рисунке 2.4.

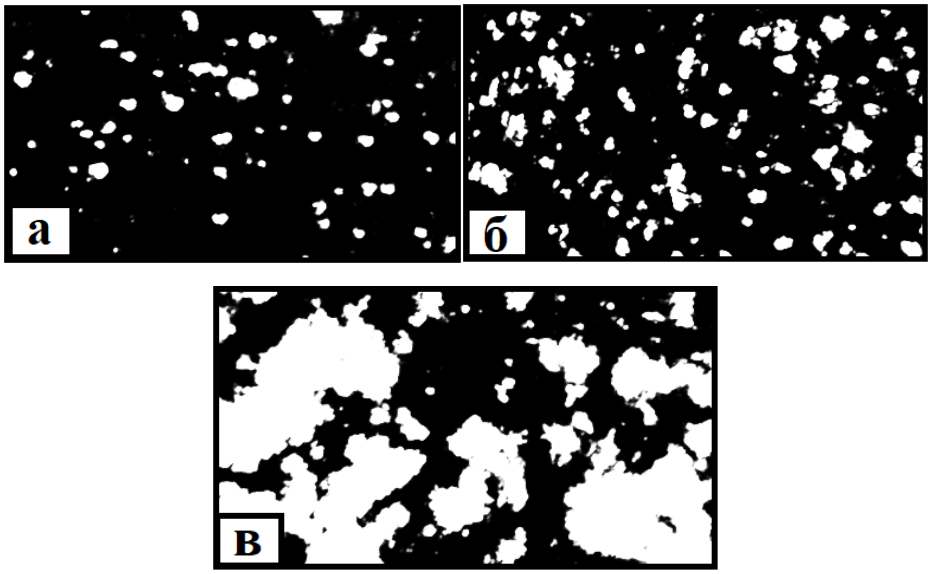


Рисунок 2.4 – Микрофотографии оптической микроскопии
проб СМ – Shell Spirax S6 ATF ZM
а) 0 км наработки; б) 90 тыс.км наработки; в) 180 тыс.км наработки

Теоретический анализ ФХ параметров СМ позволил выделить три основные причины ухудшения его эксплуатационных свойств:

– истощение активных рецептурных химических элементов присадок;

– окисление базовой углеводородной основы;

– накопление внешних загрязнений (дорожная пыль, грязь, соль, вода) и внутренних (износ, коррозия, окисление, сульфирование, сульфатирование).

Оценка изменений параметров работающего СМ требует учёта его ФХ характеристик, определяемых стандартными методами испытаний. Визуализация теоретических функциональных зависимостей основных макропараметров СМ и их характерных тенденций при эксплуатации агрегата трансмиссии АТС представлена на рисунках в виде эпюр разброса значений.

Теоретические эпюры разброса значений функциональных зависимостей параметров СМ от наработки в процессе эксплуатации ГМКП представлены на рисунке 2.5 [55, 66, 85, 86, 87].

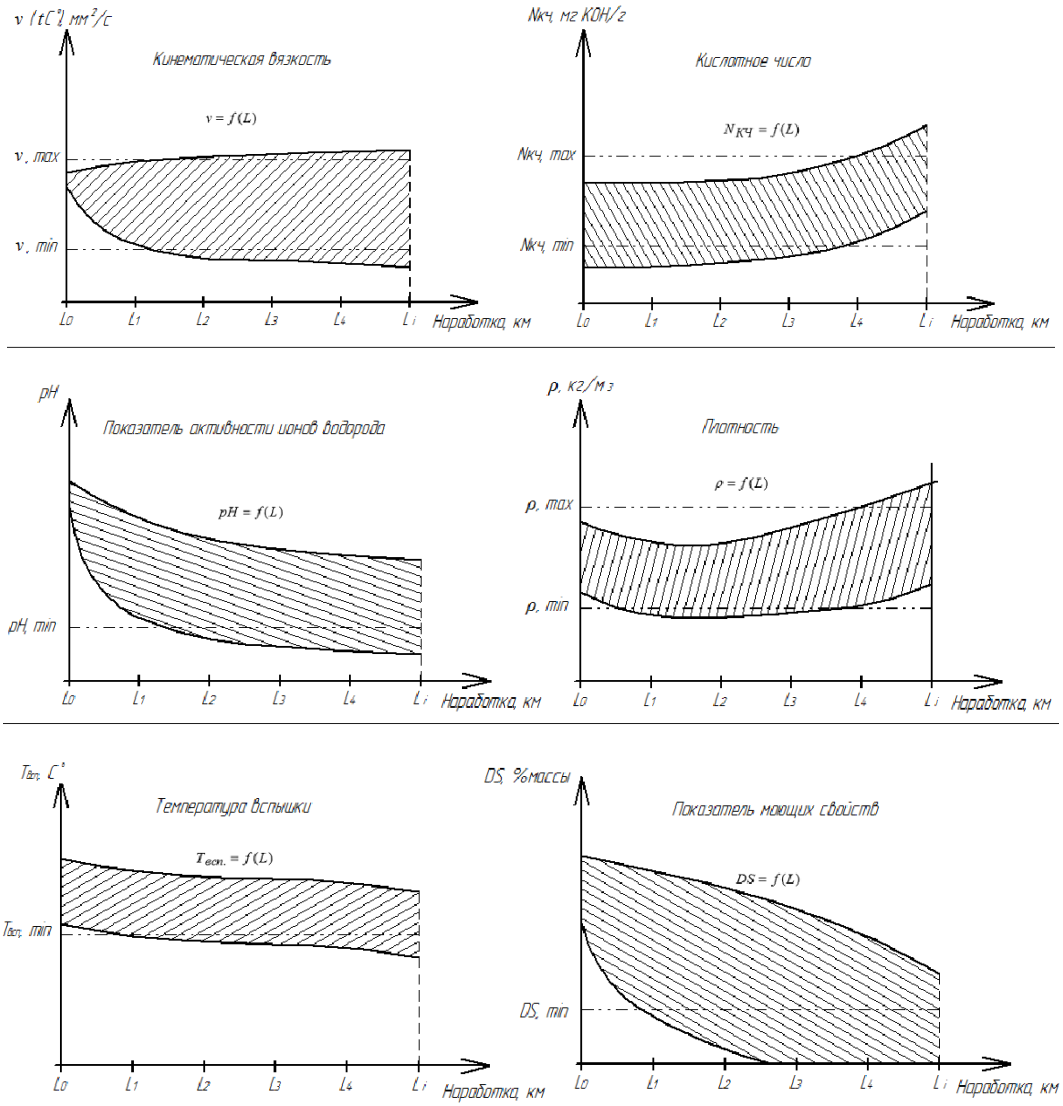


Рисунок 2.5 – Теоретические эпюры разброса значений функциональных зависимостей параметров СМ от наработки в процессе эксплуатации ГМКП

Превышение предельно-допустимых значений макропараметров СМ, приводит к изменению работоспособного состояния и эффективности работы агрегатов АТС. К примеру, снижение кинематической вязкости СМ ниже предельно допустимого для ГМКП вызывает падение давления в магистралях и каналах системы смазки ниже требуемого уровня, что вызывает явление «масляного голодания», что значительно увеличивает вероятность отказа деталей данного агрегата. Что может привести к: нарушению режимов жидкостной смазки пар трения фрикционных муфт сцепления;

интенсификации трения и ускорению износа всех трущихся пар агрегата, что комплексно сокращает его ресурс.

Теоретические эпюры разброса значений функциональных зависимостей параметров СМ от интенсивности изнашивания в процессе эксплуатации ГМКП представлены на рисунке 2.6 [55, 88, 89].

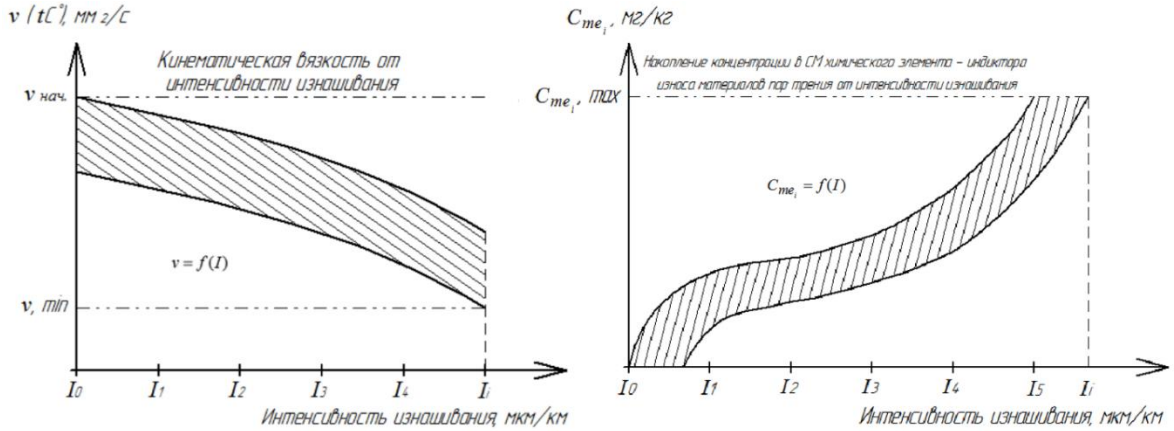


Рисунок 2.6 – Теоретические эпюры разброса значений функциональных зависимостей параметров СМ от интенсивности изнашивания в процессе эксплуатации ГМКП

Причины изменения ФХ макропараметров СМ тесно связаны с изменениями состава, структуры и свойств базовой основы СМ на микроуровне. Отклонения молекулярно-кинетической структуры группового углеводородного состава по сравнению с исходным состоянием являются ключевыми факторами, ведущими к сдвигам макропараметров СМ в процессе эксплуатации. Нарушения внутреннего строения углеводородной матрицы, вызванное химическими реакциями и влиянием присадок, непосредственно влияет на эксплуатационные характеристики СМ.

Связь микроструктурных изменений СМ с его физико-химическими и эксплуатационными параметрами подтверждена корреляционным анализом экспериментальных данных по пробам СМ ГМКП.

Корреляционная матрица взаимосвязи макро- и микроуровневых ФХ параметров СМ представлена в приложении М.

Интерпретация результатов анализа корреляционной матрицы, демонстрирует наличие статистической корреляционной значимости большинства параметров СМ с показателем наработки и друг с другом (доверительная вероятность составляет 95%). Это позволяет сделать выводы о характере взаимосвязей между ними в рамках системы «ГМКП – СМ».

Во-первых, наблюдаются накопления трех индикаторных химических элементов, свидетельствующих о механическом изнашивание деталей пары трения, в частности фрикционных муфт и подшипников качения (Fe, Al, Cu), а также загрязнений дорожного происхождения и следов попадания охлаждающей жидкости (Si, Na). Несмотря на действие фильтрующих устройств, скорость роста концентрации этих элементов может служить ключевым фактором оценки долговечности ГМКП, поскольку износ является основным ограничивающим ресурс фактором.

Во-вторых, традиционные показатели качественных характеристик СМ, такие как водородный показатель (pH), имеют обратную корреляцию с наработкой. Водородный показатель тесно коррелирует с уровнем содержания индикаторных элементов износа и показателями группового углеводородного состава ($CH_{АУ}$, $CH_{ННУ}$, $CH_{НПУ}$). что подчеркивает его чувствительность к изменениям, происходящим в структуре СМ в процессе эксплуатации.

В-третьих, исследование показало, что в процессе длительной эксплуатации групповой углеводородный состав СМ подвергается существенным изменениям, характеризующимся ухудшением антиокислительных свойств, которое как выявлено характерезуется в уменьшении доли предельных углеводородов. Это явление объясняется воздействием интенсивных температурно-окислительных процессов на структуру базового СМ.

Выявленные закономерности свидетельствуют о глубокой внутренней связи свойств СМ и технического состояния агрегатов на микро- и макроуровнях. На основе проведённых теоретических исследований и анализа

литературных источников [3, 81, 90, 91] разработана структурная схема функционирования триботехнической системы «среда – агрегат – СМ».

Структурная схема функционирования исследуемой триботехнической системы представлена в приложении Н.

Следует отметить, что реакции автокаталитического окисления, инициируемые дорожной пылью и приводящие к образованию труднорастворимых органоминеральных комплексов, в известных работах по диагностированию ГМКП не рассматриваются.

В связи с этим предложен показатель микроуровня – относительный показатель углеводородного состава, позволяющий углублённо оценивать изменение структуры, состава и свойств СМ. Выделены три уровня оценки состояния СМ: микроуровень (молекулярно-структурный) – исходный и достигнутый углеводородный и элементный химический состав СМ; макроуровень (физико-химический) – параметры, фиксируемые стандартными методами (вязкость, плотность, кислотное число, температура вспышки и др.), определяющие эксплуатационные свойства СМ (смазочные, противоизносные, противозадирные, антиокислительные); триботехнический уровень – исходные и достигнутые параметры при жидкостном трении (коэффициент трения, интенсивность изнашивания, индекс задира и др.).

Изменения ФХ параметров работающего СМ в трансмиссионных агрегатах носят постепенный характер, что связано с конструктивными особенностями и режимами эксплуатации. Система смазки механических передач, как правило, не имеет эффективной очистки, поэтому СМ может загрязняться в десятки и сотни раз сильнее моторного масла – крупными частицами износа, абразивными загрязнениями и водой [85, 92].

В процессе исследований установлено, что ФХ параметры работающего СМ в ГМКП часто не соответствуют требованиям нормативных документов производителей. Анализ отказов в первой главе позволил продолжить исследования и выявить механизм нарушения работоспособного состояния ГМКП, связанный с изменением параметров СМ на трех масштабных уровнях.

Экспериментальная проверка этих положений выполнена в ходе подконтрольной эксплуатации и представлена в главе 3.

Выводы по главе

1. Разработана классификация информации, заключённой в СМ, по источникам, процессам и методам декодирования. Установлено отсутствие моделей, связывающих изнашивание с изменением параметров работающего СМ позволяющих проводить оценку долговечности агрегатов.

2. Теоретически обосновано, что изнашивание трибосопряжений коррелирует с накоплением продуктов износа и загрязнений. Для количественной оценки абразивного и коррозионного изнашивания узлов ГМКП предложены показатели на основе концентрации кремния и кислотного числа СМ. Разработана полиномиальная математическая модель прогнозирования интенсивности изнашивания зубчатых зацеплений и фрикционных муфт ГМКП, учитывающая абразивные, коррозионно-кислотные и динамические факторы.

3. На основе анализа процессов окисления, сульфирования и сульфатации углеводородов исследованы механизмы химических изменений СМ при эксплуатации. Введён относительный показатель углеводородного состава – критерий оценки изменения группового состава СМ на микроуровне. Теоретически смоделированы реакции, приводящие к образованию коррозионно-активных соединений и ускорению изнашивания.

4. Разработана структурная схема функционирования триботехнической системы «среда – агрегат – СМ», объединяющая три уровня оценки: микроуровень (углеводородный и химический состав), макроуровень (ФХ параметры) и триботехнический уровень. Подтверждена корреляционная связь между структурными изменениями СМ и его эксплуатационными свойствами, что соответствует принципу «состав – структура – свойства»

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА И ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

3.1 Особенности условий подконтрольной эксплуатации автобусов входе исследований

Для реализации поставленных задач исследования были организованы подконтрольные эксплуатационные испытания ГМКП городских автобусов ОБК. Испытания проводились в реальных условиях на типичном городском маршруте ГУП ПАТ в течение межсервисного периода, равного регламентированной периодичности ТО. В ходе испытаний осуществлялся периодический отбор проб СМ для последующего анализа изменения его физико-химических и триботехнических параметров с начальных этапов эксплуатации ГМКП.

Для проведения подконтрольных эксплуатационных испытаний на базе ГУП ПАТ была разработана «Методика проведения эксплуатационных испытаний технических жидкостей агрегатов трансмиссии» представленная в приложении П, а также определены: перечень автобусов ОБК и городской маршрут их транспортной работы (маршрут №123 города Санкт-Петербурга).

Перечень подконтрольных автобусов и их характеристики представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Перечень подконтрольных автобусов и их характеристики

Марка, модель АТС, VIN	Volgabus 627102 CityRhythm 18, XKM627102N0000020	Volgabus 627102 CityRhythm 18, XKM627102N0000013	Volgabus 627102 CityRhythm 18, XKM627102N0000035
Гаражный номер	2300	2301	2401
Государственный регистрационный номер	Н 247 КК 198	Н 004 КК 198	Н 250 КК 198
Год изготовления (в соответствии с ПТС)	2022	2022	2022
Назначение АТС	Линейный	Линейный	Линейный
Категория АТС	М3 (I)	М3 (I)	М3 (I)
Тип АТС	Автобус ОБК	Автобус ОБК	Автобус ОБК

Марка, модель АТС, VIN	Volgabus 627102 CityRhythm 18, XKM627102N0000020	Volgabus 627102 CityRhythm 18, XKM627102N0000013	Volgabus 627102 CityRhythm 18, XKM627102N0000035
Общий пробег АТС на начало испытаний, км.	1898	1914	1896
Марка и модель двигателя	Yuchai, YC6L350-50	Yuchai, YC6L350-50	Yuchai, YC6L350-50
Тип топлива	Дизель	Дизель	Дизель
Максимальный крутящий момент, Н·м ($мин^{-1}$):	1370 (1200-1600)	1370 (1200-1600)	1370 (1200-1600)
Название, марка и модель подконтрольного агрегата/узла/механизма:	ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B	ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B	ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B
Передаточные отношения коробки передач:			
1-я	3,360		
2-я	1,910		
3-я	1,420		
4-я	1,000		
5-я	0,720		
6-я	0,620		
З.Х.	4,240		
Передаточное отношение главной передачи	7,360		
Общая наработка (агрегата/узла/механизма) с начала эксплуатации на начало испытаний, км.	1898	1914	1896
Спецификация СМ	ZF TE-ML-20		
Марка испытываемого СМ	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM
Периодичность замены СМ, км	180000	180000	180000

Направление следования по маршруту №123 – рейс автобуса начинается от остановки автобусная станция ул. Жени Егоровой (59,93149007; 30,43946731) до остановки станция метро «Ладожская» ул. Гранитная (60,06464017; 30,31391118) и заканчивается обратным следованием до остановки автобусная станция ул. Жени Егоровой (59,93149007; 30,43946731). Протяжённость одного рейса по маршруту составляет 54,5 км. Среднесуточный пробег при выполнении транспортной работы на данном маршруте составляет 220 км.

Входе подконтрольных испытаний ежедневно велся трек-мониторинг выполнения транспортной работы подконтрольных автобусов по средству «Автоматизированной системы управления городским и пригородным пассажирским транспортом общего пользования в Санкт-Петербурге», получаемой навигационных данных от бортового

оборудования системы «Global Positioning System / Глобальная навигационная спутниковая система» подконтрольных автобусов.

Маршрут №123 соединяет три района города Санкт-Петербурга: Выборгский, Калининский и Красногвардейский, а также проходит через четыре станций метро (Проспект Просвещения, Озерки, Площадь Мужества, Ладожская) и одну железнодорожную станцию (Пискарёвка).

Маршрут делится на две части по направлению следования:

Первая часть – от остановки автобусная станция ул. Жени Егоровой до остановки станция метро «Ладожская» ул. Гранитная.

Вторая часть – от остановки станции метро «Ладожская» ул. Гранитная до остановки автобусная станция ул. Жени Егоровой.

Трек маршрута движения по направлению следования подконтрольного автобуса представлен на рисунке 3.1.

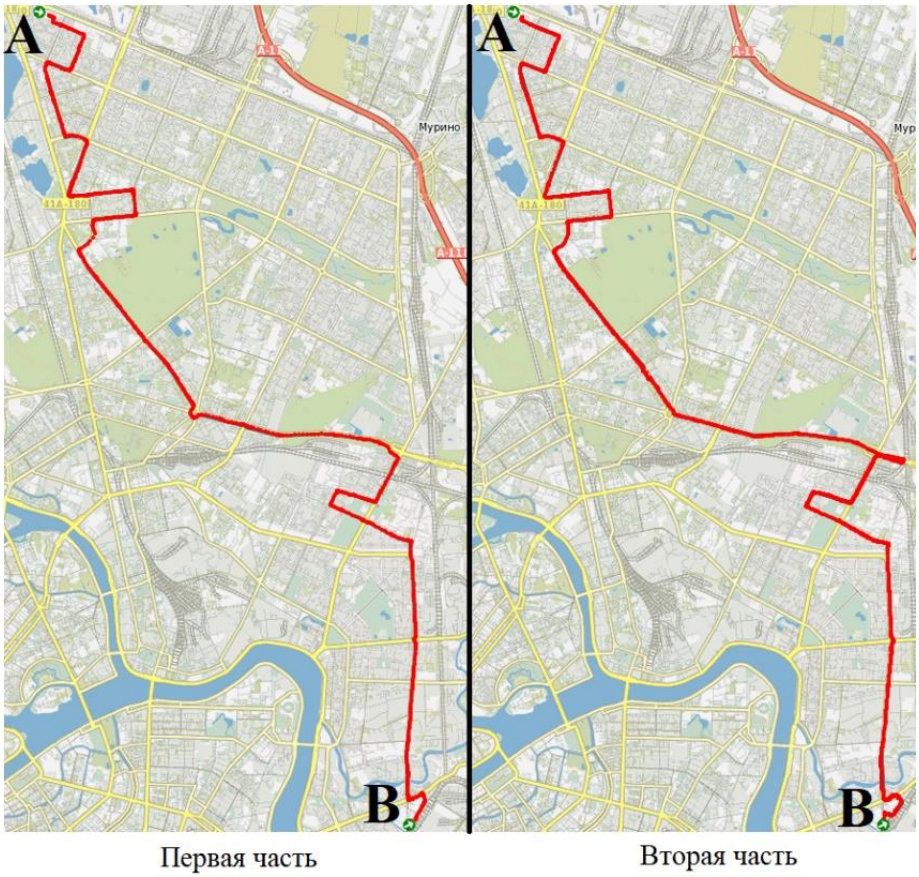


Рисунок 3.1 – Трек маршрута движения по направлению следования подконтрольного автобуса: А - остановка автобусная станция ул. Жени Егоровой; В - остановка станция метро «Ладожская» ул. Гранитная.

На протяжении одного рейса по маршруту автобус останавливается на стратегических остановках для посадки и высадки пассажиров 111 раз, так как в первой части маршрута 55 стратегических остановок, а во второй 56 стратегических остановок.

На маршруте также присутствуют дорожные объекты требующие снижения скоростного режима, а именно:

- Перекрестки (регулируемые и нерегулируемые) – 46 шт.
- Нерегулируемые пешеходные переходы – 18 шт.
- Пересечение трамвайных путей – 5 шт.
- Железнодорожный переезд – 1 шт.

Специфичность данного маршрута заключается в наличии двух объектов транспортной инфраструктуры - путепроводов, которые оказывают влияние на нагрузочные режимы автобуса. Эти сооружения влияют на условия движения, что, в свою очередь, влияет на нагрузочные режимы работы агрегатов и общую производительность транспортной работы автобусов.

Однако, выбранный маршрут для подконтрольных испытаний является среднестатистическим (типичным) для городских автобусов ОБК большей части современных мегаполисов России. Он позволяет получить объективные данные о работе агрегатов городских автобусов в условиях, максимально приближенных к общезначимым, и выявить технические недостатки, требующие решения по их устранению для повышения надежности технической работы агрегатов и систем автобусов.

Результаты статистических показателей транспортной работы подконтрольных автобусов на маршруте представлены на рисунке 3.2.

Маршрут подконтрольных испытаний относится к III категории автомобильных дорог по рельефному профилю [93].

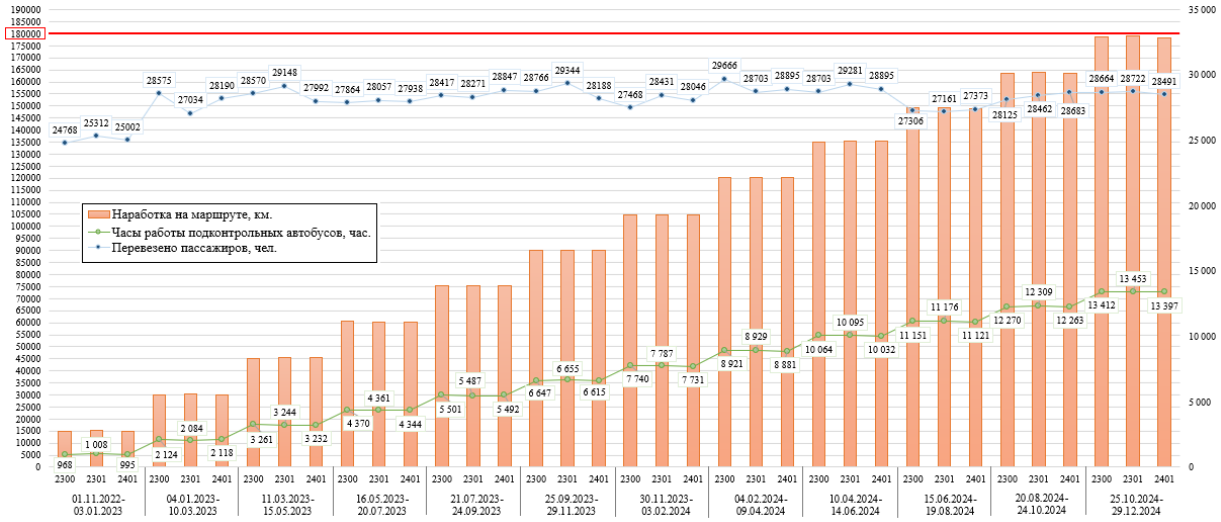


Рисунок 3.2 – Результаты статистических показателей транспортной работы подконтрольных автобусов на маршруте

К этой категории относятся автомобильные дороги равнинной местности, а именно с типами рельефов, у которых продольный уклон не превышает 10% на протяжении не менее 500 м. Частота изменения высот на маршруте транспортной работы автобуса влияет на нагрузочные режимы работы его агрегатов.

Профиль рельефа первой части маршрута представлен на рисунке 3.3.

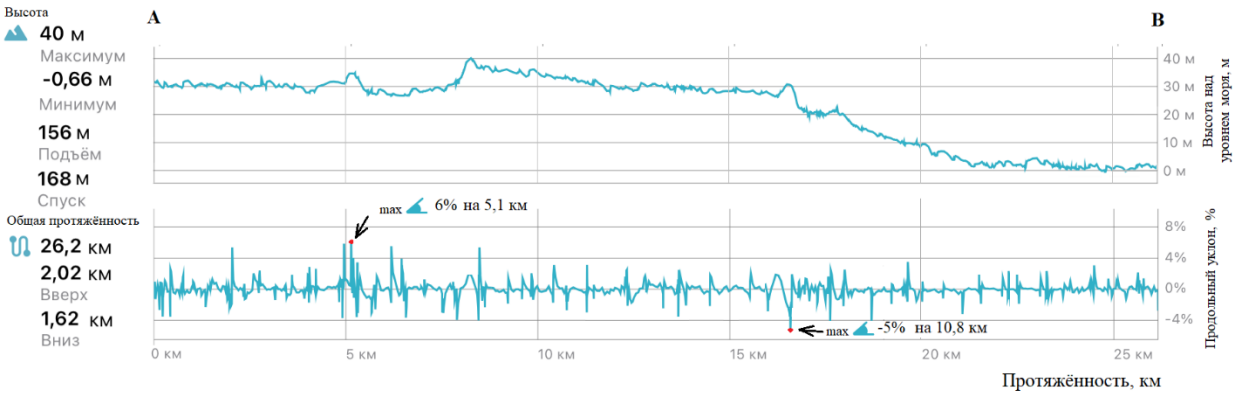


Рисунок 3.3 – Профиль рельефа первой части маршрута

Профиль рельефа второй части маршрута представлен на рисунке 3.4.

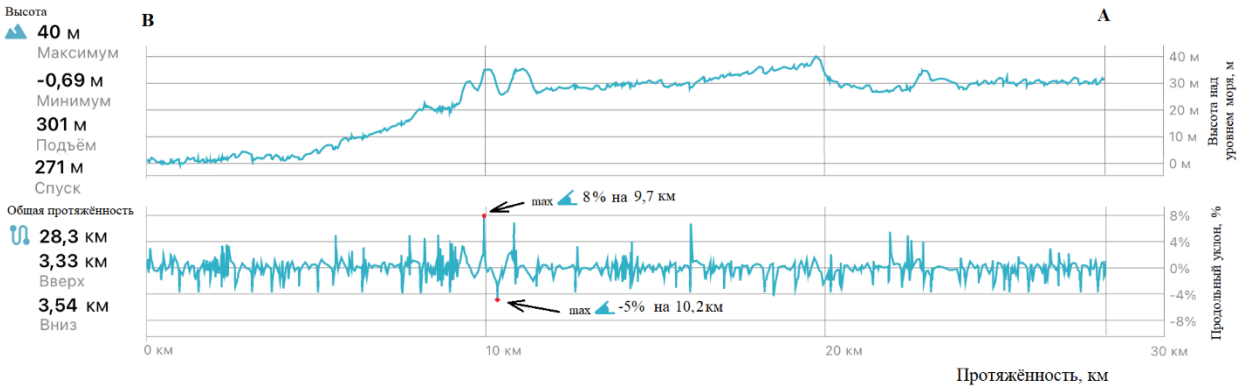


Рисунок 3.4 – Профиль рельефа второй части маршрута

В первой части маршрута по диаграмме профиля рельефа высота над уровнем моря снижается, однако имеется один подъем с перепадом высоты 14 м. На протяжении маршрута максимальный продольный уклон составил 6% на 5,1 км следования. По диаграмме профиля второй части маршрута видно, что автобус по ходу следования подымается над уровнем моря с максимальной отметкой 40 м, а также отмечены два значительных уклона (8%) на 9,7 км при заезде на второй путепровод по ходу следования и съезде с него с уклоном (-5%) с перепадом высоты 10 м на протяжении 500 м.

При движении по участок второй части маршрута с 9 по 11,5 км – (движение по двум путепроводам) – ГМКП автобуса испытывает повышенные рабочие нагрузки, что приводит к увеличению рабочего температурного режима. Также существенное влияние оказывает значительный рост теплового потока к ГМКП от нагревающегося на подъемах двигателя автобуса. Ситуация ухудшается в летний период года, когда температура окружающего воздуха составляет от +15°С и выше. В таких условиях работы резко увеличивается количество отказов ГМКП.

Также в части оценки эксплуатационных условий маршрута проведен анализ кинематики движения автобуса в пиковые часы загрузок дорожной сети города в рабочие календарные дни (7:30-11:30 и 17:00-21:00). В данные часы снижается интенсивность движения транспорта из-за дорожных заторов, что также влияет на нагрузочные режимы работы его агрегатов.

Анализ проблемных участков интенсивности движения транспорта на маршруте представлен на рисунке 3.5.

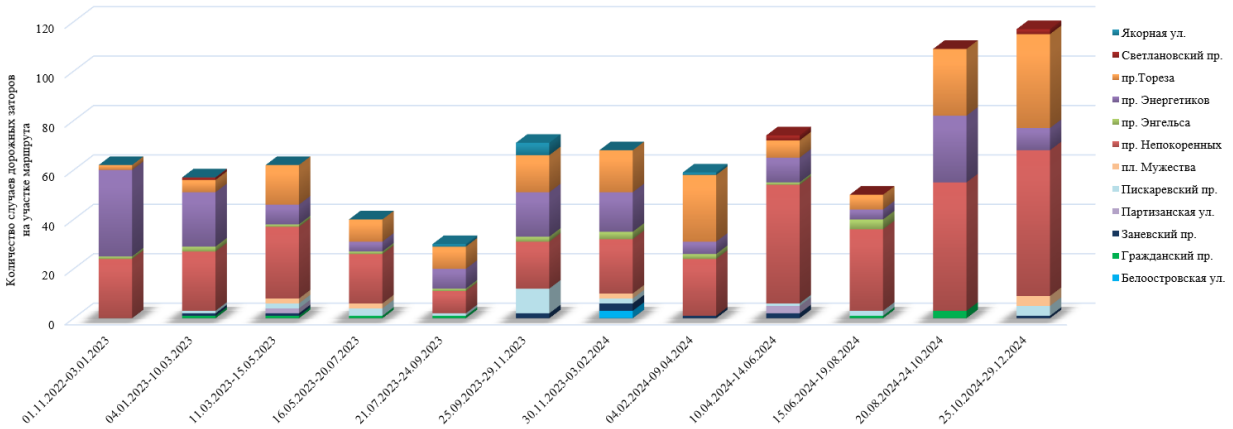


Рисунок 3.5 – Анализ проблемных участков интенсивности движения транспорта на маршруте

По результатам анализа в течении периода подконтрольных эксплуатационных испытаний автобусов выявлены следующие проблемные участки на маршруте, влияющие на интенсивность движения транспорта в пиковые часы загруженности транспортной сети: пр.Непокоренных – (вероятность дорожного затора 45%), пр.Энергетиков – (вероятность дорожного затора 21%), пр.Тореза – (вероятность дорожного затора 22%)

Результаты кинематики движения автобусов по маршруту с 7:30 до 11:30 представлены на рисунке 3.6.

Средняя техническая скорость на маршруте в рассматриваемое время пиковой нагрузки транспортной сети составила 15 км/ч, а максимальная скорость составила 77 км/ч. В свою очередь, средние значения, характеризующие разгон и замедление составили: ускорение при разгоне – 0,64 м/с^2, а замедление – 0,74 м/с^2.

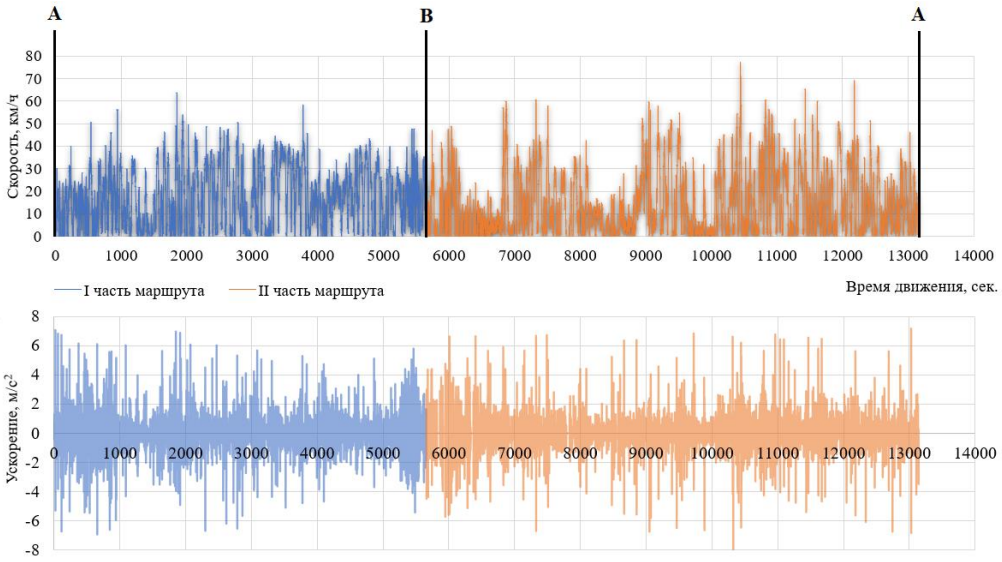


Рисунок 3.6 – Результаты кинематики движения автобусов по маршруту с 7:30 до 11:30

Результаты кинематики движения автобусов по маршруту с 17:00 до 21:00 представлены на рисунке 3.7.

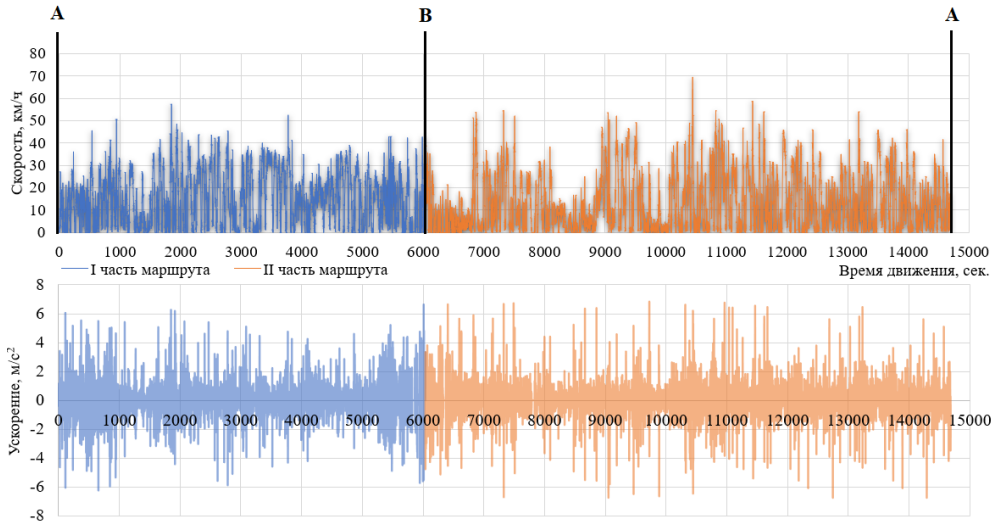


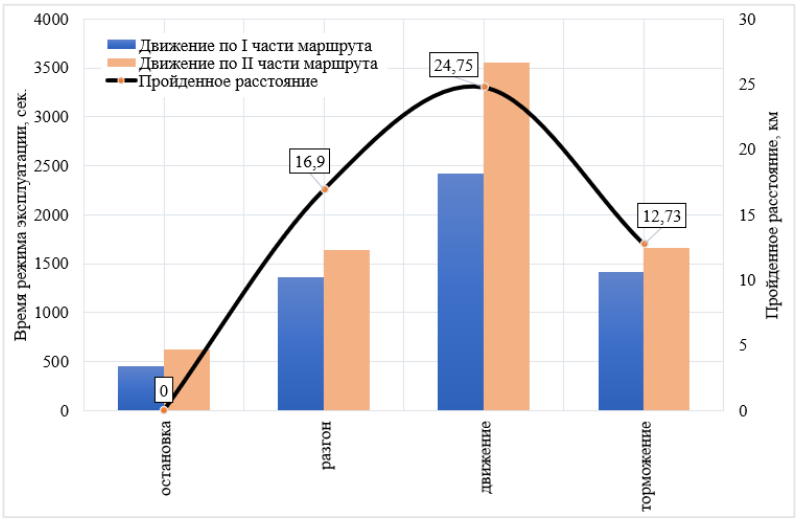
Рисунок 3.7 – Результаты кинематики движения автобусов по маршруту с 17:00 до 21:00

Средняя техническая скорость на маршруте в рассматриваемое время пиковой нагрузки транспортной сети составила 13 км/ч, а максимальная скорость составила 69 км/ч. В свою очередь, средние значения,

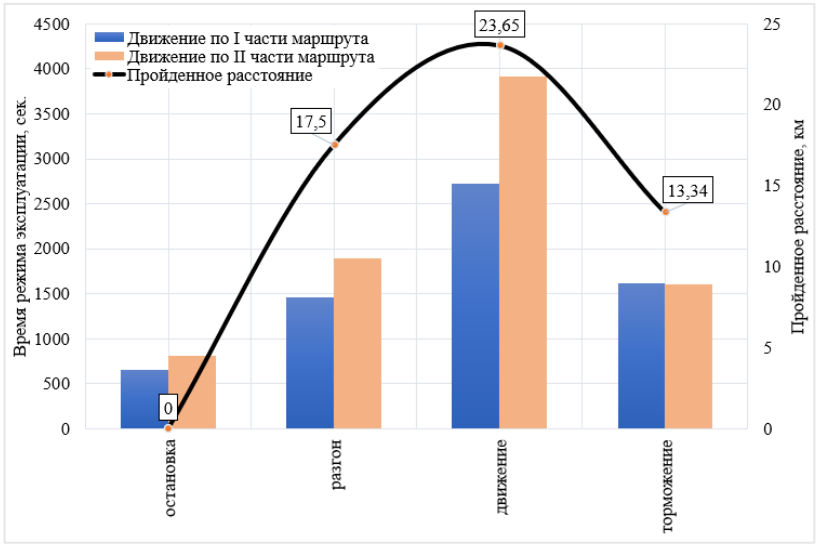
характеризующие разгон и замедление составили: ускорение при разгоне – 0,62 м/с^2, а замедление – 0,69 м/с^2.

По результатам кинематики движения проанализированы режимы эксплуатации подконтрольных автобусов.

Гистограмма распределения режимов эксплуатации автобусов по маршруту представлена на рисунке 3.8.



а



б

Рисунок 3.8 – Гистограмма распределения режимов эксплуатации автобусов по маршруту:

а - движения автобусов в пиковые часы с 7:30 до 11:30;

б - движения автобусов в пиковые часы с 17:00 до 21:00.

Оценка стилей вождения по интенсивностям разгонов и замедлений подконтрольных автобусов на маршруте в пиковые часы транспортной работы представлена на рисунке 3.9.

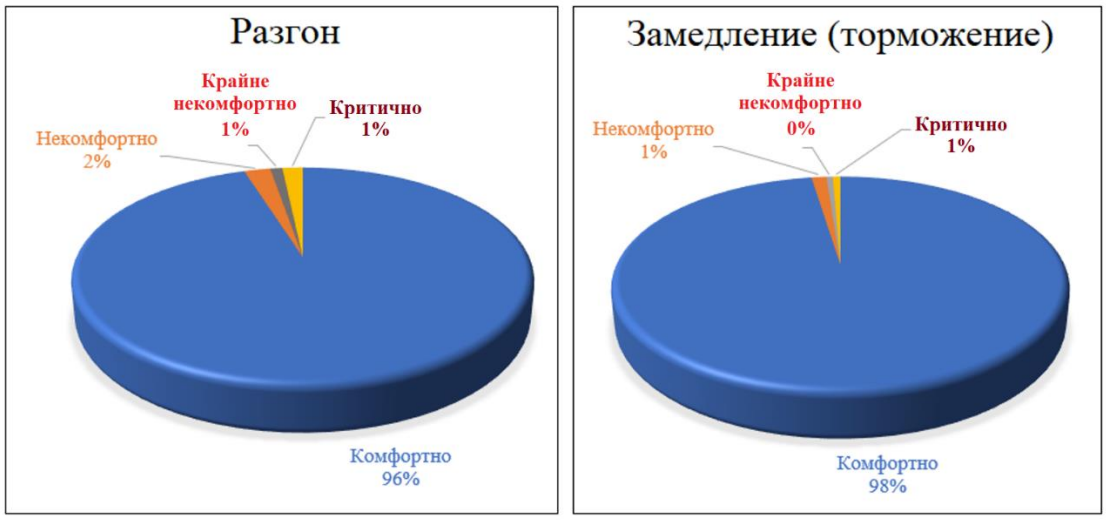


Рисунок 3.9 – Оценка стилей вождения по интенсивностям разгонов и замедлений подконтрольных автобусов на маршруте в пиковые часы транспортной работы

Календарная продолжительность подконтрольных эксплуатационных испытаний автобусов составила 2 года 2 месяца. По результатам анализа кинематики движения подконтрольных автобусов по маршруту №123 можно сделать следующие выводы.

Для выполнения транспортной работы по второй части маршрута в среднем требуется на 12% больше времени, а также в данной части маршрута наблюдается увеличение времени работы автобусов в эксплуатационных режимах - торможения и разгона, что негативно сказывается на нагрузочных рабочих режимах ГМКП.

Следует отметить, что в рассматриваемые пиковые часы транспортной работы значения пассажиропотока увеличиваются, и масса автобуса достигает, а зачастую и превышает, технически допустимую максимальную массу (28000 кг). Это приводит к ускоренному износу внутренних пар трения агрегатов и отрицательной динамики изменения ПРСМ, так как повышаются нагрузочные и температурные режимы работы.

Также в части функциональной работы ГМКП по результатам анализа средней технической скорости, агрегат большую часть времени выполняет транспортную работу на первой и второй передачах, поскольку средняя техническая скорость за весь период подконтрольных испытаний составила 14 км/ч. Кроме того, анализ эксплуатационных режимов работы подконтрольных автобусов на маршруте позволил выявить объем выполняемой работы в условиях частых разгонов и остановок, который подтвердил причину ускоренных износов фрикционных дисков муфты сцепления "А" ГМКП ZF EcoLife1 6AP1700B, которая отвечает за передачи с первой по четвертую. При данных условиях увеличивается частота переключений с нейтрального положения "N" на первую и вторую передачи и обратно, которые и осуществляет данная фрикционная муфта сцепления.

В части оценки влияния стилей вождения на техническое состояние агрегатов автобусов можно сделать следующие выводы. По результатам анализа кинематики движения автобусов за период подконтрольных испытаний не было выявлено частых превышений ускорений в разгоне и торможении. Доля комфортных разгонов составляет 96%, а комфортных торможений – 98%. В качестве предельных значений рекомендуется принимать 85%.

Следовательно, торможения и ускорения водителей, работающих на подконтрольных автобусах, преимущественно комфортные. Таким образом, влияние стилей вождения на техническое состояние агрегатов в данных подконтрольных испытаниях можно считать незначительным.

3.2 Исследования физико-химических параметров смазочных материалов при эксплуатации ГМКП

ФХ параметры работающего СМ в процессе эксплуатации ГМКП изменяются под воздействием окисления, сульфирования, полимеризации, деструкции присадок и накопления загрязнений, что приводит к снижению его

эксплуатационных свойств [3, 4, 35, 45, 48, 55, 77, 94, 95, 96]. Несмотря на ограниченный контакт с кислородом по сравнению с моторными маслами, напряжённые нагрузочные режимы (крутящий момент до 1700 Н·м, колебания температуры от отрицательных до 100 °С, частые разгоны и остановки) ускоряют изменение параметров СМ. Для количественной оценки этих изменений в ходе подконтрольных испытаний ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B проведены исследования данных параметров работающего СМ Shell Spirax S6 ATF ZM.

Отбор проб СМ осуществлялся через каждые 15 000 км. Анализ проб проводился в сертифицированной лаборатории Санкт-Петербургского филиала испытательного центра АО «СЖС Восток Лимитед». Исследуемые параметры и методы их испытаний приведены в Приложениях Д.

Перечень используемого испытательного и инструментального оборудования для исследования ФХ параметров СМ представлен в приложении Р.

При определении значения параметра за итоговое результирующее принимали среднее арифметическое трёх последовательных серий измерений или значения в соответствии с требованиями метода испытаний.

По результатам лабораторных исследований построены графические модели, отражающие зависимости изменения ПРСМ – Shell Spirax S6 ATF ZM от наработки ГМКП ZF Ecolaif 1 6AP1700B (исследуемого объекта) в городских условиях эксплуатации [29, 86, 87].

Лабораторные отчеты результатов исследований проб СМ Shell Spirax S6 ATF ZM представлены в приложении С.

Зависимости изменения кинематической вязкости и индекса вязкости СМ от наработки исследуемого объекта представлены на рисунке 3.10.

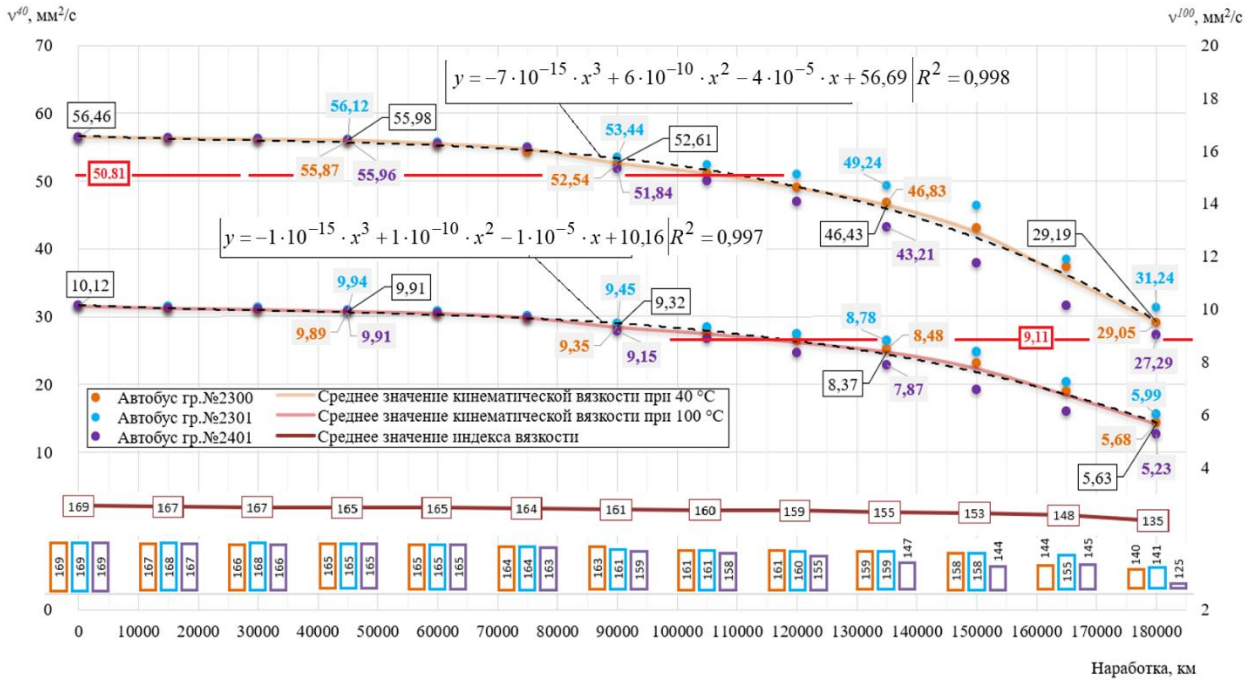


Рисунок 3.10 – Зависимости изменения кинематической вязкости и индекса вязкости СМ от наработки исследуемого объекта

К этапу завершения испытаний параметры вязкости достигли не допустимых значений: средняя кинематическая вязкость при температуре 40 °С снизилась на 48 % (до 29,19 мм²/с), а при 100 °С – на 44% (до 5,63 мм²/с); индекс вязкости сократился на 35 единиц. Коэффициент вариации вязкостных параметров составил 4%, что меньше 10%, а значит рассеивания полученных значений считается незначительным.

Уменьшение кинематической вязкости обусловлено механическим разрушением рецептурных компонентов, повышающих индекс вязкости СМ. Допустимое отклонение данного параметра – 10-15%, предельное (критическое) – свыше 35-40%, требующее замены СМ во избежание критической эксплуатации агрегата [3].

Изменение температурных параметров СМ от наработки исследуемого объекта представлены на рисунке 3.11.

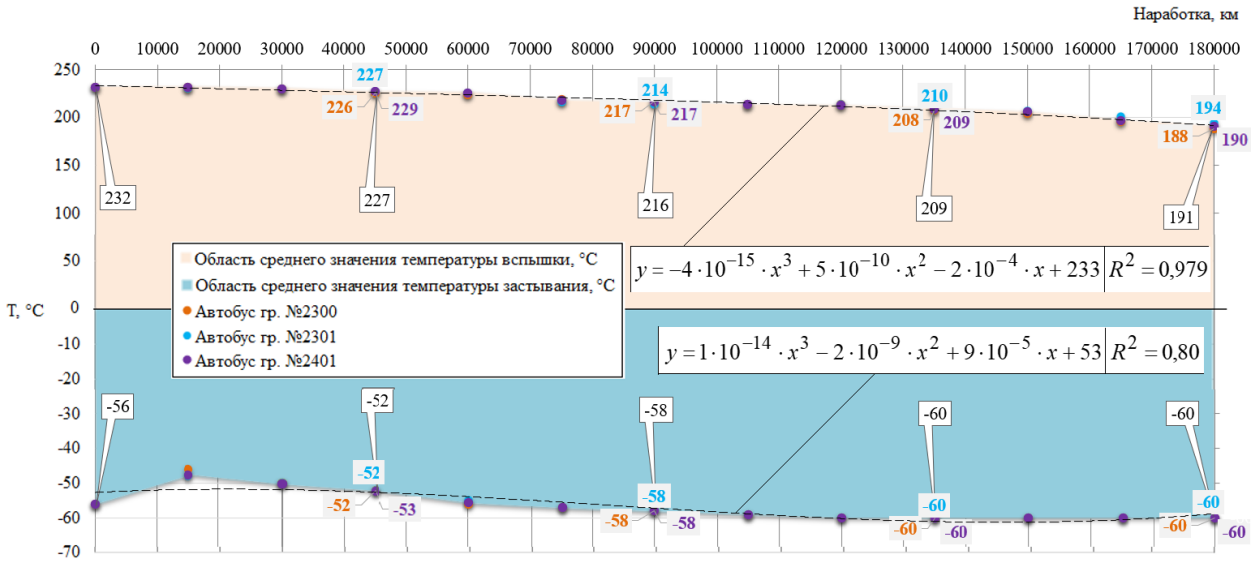


Рисунок 3.11 – Изменение температурных параметров СМ от наработки исследуемого объекта

Снижение низкотемпературных параметров в процессе начальных этапов подконтрольных испытаний связано с добавлением в компонентный состав СМ депрессорной присадки полиметакрилатного типа, которая срабатывает после определенного интервала наработки. Срабатывание данной присадки приводит к повышению температуры застывания [86].

Снижение температуры вспышки на 18 % в первую очередь, связано с накоплением в процессе наработки концентрации продуктов окисления и сульфирования СМ ввиду накапливающихся загрязняющих соединений (вода и пыль-частицы кремния).

В соответствии с «ТР ТС 030/2012. Технический регламент Таможенного союза. О требованиях к смазочным материалам и специальным жидкостям» предельное значение данного параметра для СМ ГМКП – не менее 135 °С [97].

Зависимость изменения плотности СМ от наработки исследуемого объекта представлена на рисунке 3.12.

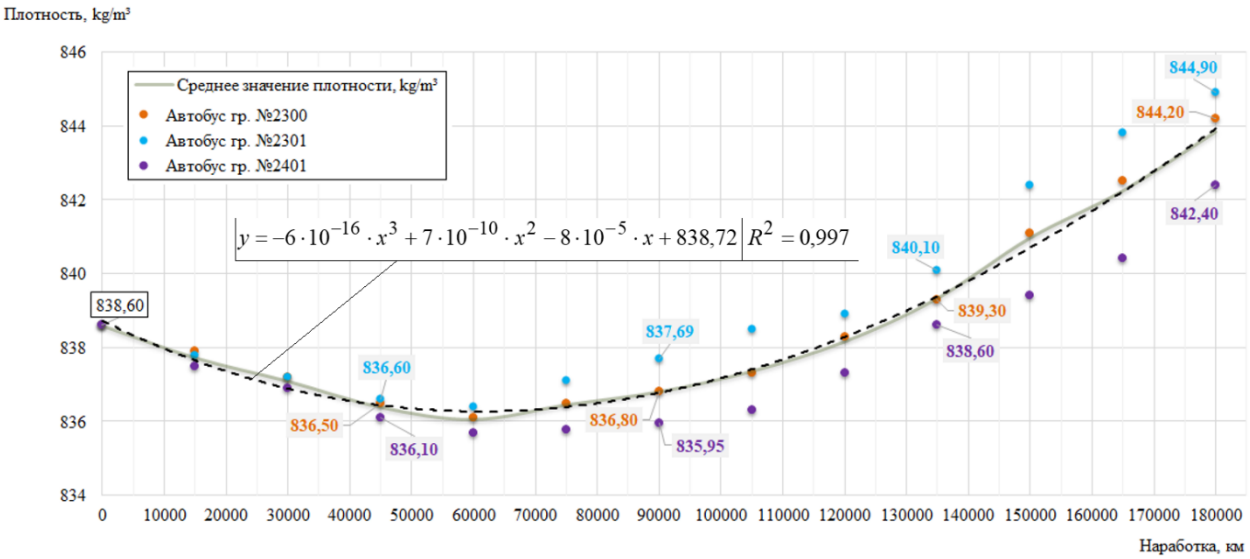


Рисунок 3.12 – Зависимость изменения плотности СМ от наработки исследуемого объекта

Средняя плотность масла снизилась на 0,3% (до 836,07 кг/м³) после 60 тыс. км пробега, затем возросла до 843,83 кг/м³ к концу испытаний. Первоначальное уменьшение плотности вызвано деградацией модификаторов вязкости, последующее увеличение – накоплением воды, продуктов износа, нерастворимого твердого осадка и окислительными процессами [86].

Снижение плотности увеличивает риск вспенивания масла, что снижает эффективность его работы. Увеличение объема пены сигнализирует о критическом (предельном) снижении плотности СМ или высокой концентрации воды [4].

Зависимости изменения кислотного числа и коррозионной активности СМ Shell Spirax S6 ATF ZM от наработки ГМКП ZF Ecolaif 1 6AP1700B

Зависимости интенсификация кислотного числа и коррозионной активности СМ от наработки в исследуемом объекте представлены на рисунке 3.13.

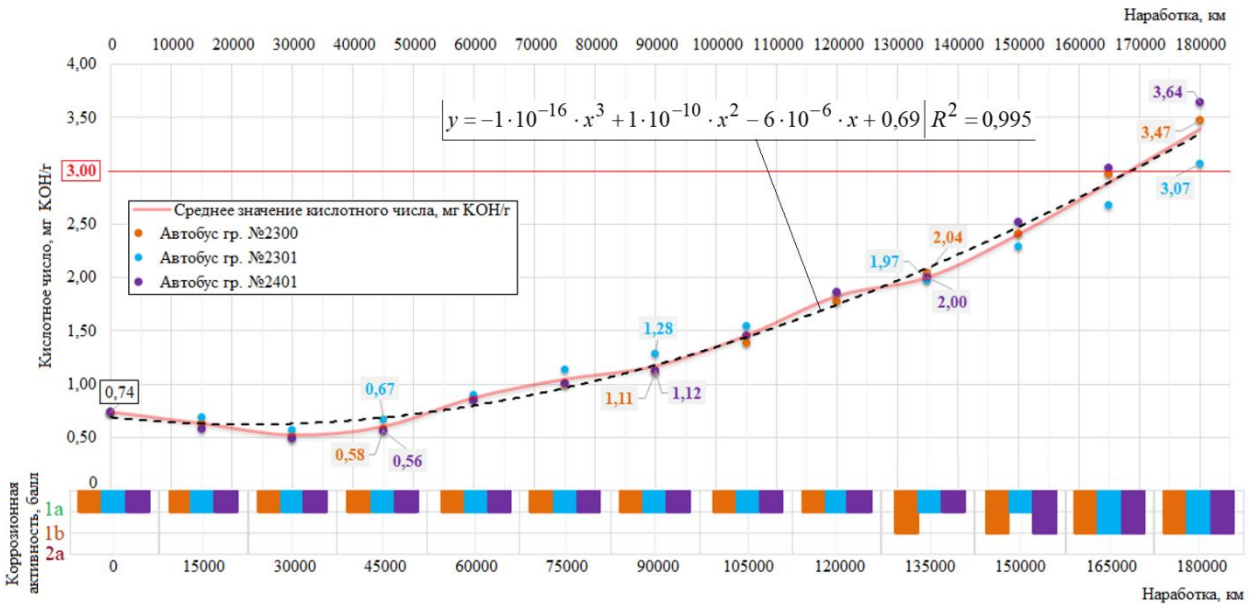


Рисунок 3.13– Зависимости интенсификация кислотного числа и коррозионной активности СМ от наработки в исследуемом объекте

Степень срабатывания противозадирных и противоизносных присадок в СМ можно оценить по изменению уровня кислотного числа. Первоначальная концентрация противозадирных, противоизносных и антиокислительных присадок влияет на исходное значение кислотного числа [5].

Кислотное число снижается на 29% до 0,52 мг КОН/г при пробеге 30 000 км, увеличиваясь далее до 3,39 мг КОН/г к концу испытаний, что соответствует активации антиокислительной присадки и характерно для СМ ГМКП. Допустимым пределом кислотного числа считают величину ≤ 3 мг КОН/г [5].

До пробега 150 000 км сохраняется низкая коррозионная активность СМ «балл 1а». Однако на автобусе гр. № 2300 при наработке 135 000 км коррозионная активность достигает критического (предельного) уровня «балл 1b», а кислотное число достигает высокого значения (2,04 мг КОН/г). При достижении наработки 180 000 км у всех образцов коррозионная активность возрастает до недопустимого критерия «балл 1b», а среднее значение кислотного числа превышает браковочные нормы.

Сопоставление концентрации элементов износа деталей ГМКП и накопления нерастворимых твердых осадков в СМ в процессе наработки исследуемого объекта представлено на рисунке 3.14.

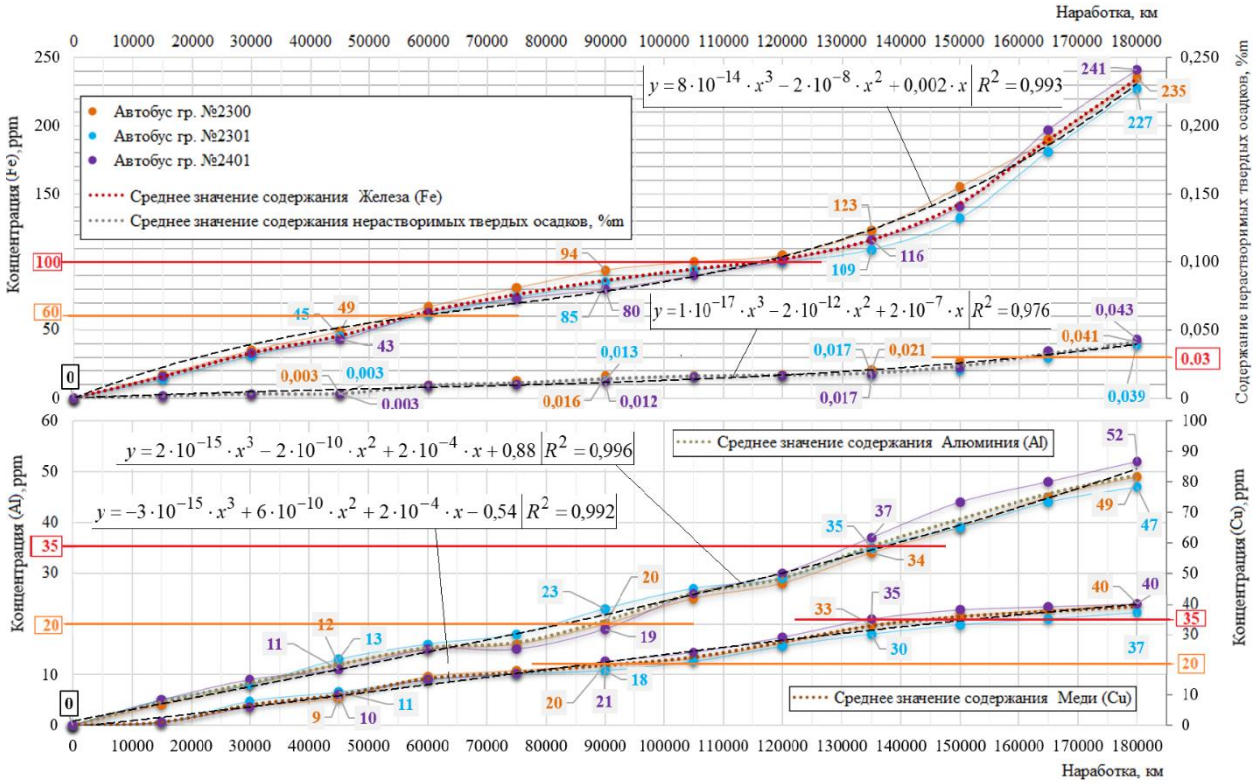


Рисунок 3.14 – Сопоставление концентрации элементов износа деталей ГМКП и накопления нерастворимых твердых осадков в СМ в процессе наработки исследуемого объекта

Оценка роста концентрации элементов износа деталей показала, что в СМ в процессе эксплуатации ГМКП накапливаются частицы металлов: железа (Fe), алюминия (Al) и меди (Cu). Причем в большей степени накапливаются железные и алюминиевые частицы контактирующих поверхностей трения (контактов зубьев шестерен, зон трения в игольчатых подшипниках, зон трения деталей фрикционных муфт (металлокерамических дисков, гидроцилиндрических поршней) и деталей гидротрансформатора (реактора, турбинного и насосного колеса) и д.р.).

Браковочная норма концентрации железа (Fe) для СМ ГМКП составляет 60 ppm, а концентрация в 100 ppm является предельным значением, что

требует оперативной замены СМ [10]. По результатам исследования к 60 000 км наработки средняя концентрация железа (Fe) составила 64 ppm, а к 120 000 км наработки достигло предельной отметки и к завершению испытаний составляло 234 ppm, превысив норму в 3,9 раза, а критическую в 2,3 раза. Эксплуатация ГМКП при полученных значениях концентрации железа (Fe) после 120 000 км наработки категорически не допустима.

Браковочная норма концентрации алюминия (Al) и меди (Cu) – 20 ppm, а концентрация в 35 ppm является критическим значением, рекомендуется оперативная замена СМ [26].

По результатам исследования к 90 000 км наработки средняя концентрация алюминия (Al) составила 21 ppm и меди (Cu) – 20 ppm, а к 135 000 км наработки концентрация достигла предельного значения и к завершению испытаний уже составляло 49 ppm алюминия (Al) и 39 ppm меди (Cu). Эксплуатация ГМКП при полученных значениях концентрации алюминия (Al) и меди (Cu) после 135 000 км наработки категорически не допустима.

Исследования содержания доли нерастворимых твердых осадков в СМ показали, что до 45 000 км наработки значение показателя оставалось стабильным в средней отметки до 0,003 %m, а затем наступил этап плавного роста. Так средняя концентрация нерастворимых твердых осадков к наработки 165 000 км превысила браковочную норму – 0,03 %m [6], а к концу подконтрольных испытаний значение концентрации достигло максимально недопустимого уровня – 0,043 %m, превысив браковочную норму на 43%.

Средний коэффициент вариации при оценке роста концентрации элементов износа и накопления нерастворимых твердых осадков в исследуемом СМ, составил 7%. Поскольку это значение меньше 10%, рассеивание полученных данных можно считать незначительным, что указывает на однородность совокупности полученных значений [8].

Дальнейшая эксплуатация ГМКП при достижении перечисленных значений концентраций частиц, накапливающихся в процессе эксплуатации, недопустима.

Изменение концентрации элементов загрязнения СМ в процессе наработки исследуемого объекта представлена на рисунке 3.15.

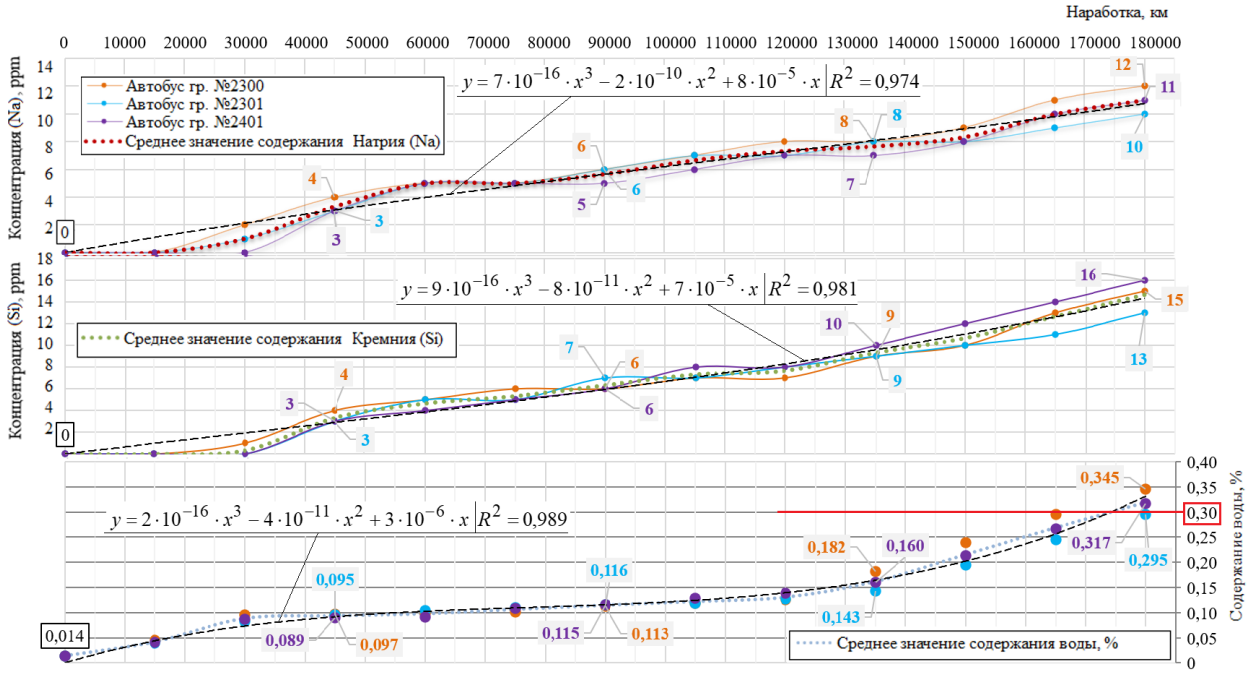


Рисунок 3.15 – Изменение концентрации элементов загрязнения СМ в процессе наработки исследуемого объекта

Испытания показали накопление в СМ следующих элементов загрязнений: натрий (Na) – 11 ppm, кремний (Si) – 15 ppm, содержание воды – 0,319%. Коэффициент вариации полученных данных – 15%, что указывает на среднюю однородность результатов, следовательно, совокупность полученных значений обладает умеренной доверительной стабильностью [6, 25, 86].

Причины повышения концентраций:

– кремний (Si) поступает с дорожной грязью и износом эластомерных материалов в агрегате;

– натрий (Na) поступает из дорожной соли и вследствие неисправностей элементов системы охлаждения;

– вода (H_2O) попадает вследствие неисправностей элементов системы охлаждения, вентиляции картера и износа эластомерных материалов.

Концентрации Si и Na остались ниже выбраковочных уровней (25 ppm). Концентрация воды постепенно росла, превысив предельную (критическую) отметку (0,3%) [98] на последнем этапе испытаний. Превышение норма содержания воды в СМ может привести к различным негативным последствиям, таким как образование пены, появление нерастворимых осадков, быстрое окисление СМ в результате гидролиза, повышенный износ деталей вследствие коррозии, механические повреждения из-за разрывов смазочной пленки и др. [26, 86].

Выше сказанное позволяет сделать вывод что исследуемый агрегат каждого подконтрольного автобуса хорошо изолирован от попадания загрязняющих дорожных факторов, а также за период испытаний аварийных ситуаций по нарушению герметизации охлаждающих теплообменников не происходило.

Изменение концентрации активных элементов присадок в СМ в процессе наработки исследуемого объекта представлена на рисунке 3.16.

Оценка истощения концентрации активных элементов присадок СМ показала, что в рецептуре исследуемого СМ Shell Spirax S6 ATF ZM использованы следующие активные элементы [5]:

– фосфора (P) и серы (S) – противозадирная и противоизносная присадка;

– кальция (Ca) – моюще-диспергирующая присадка;

– бора (B) – противоизносная и антиоксидантная присадка, а также как компонент, ингибирующий коррозию;

– магния (Mg) – моюще-диспергирующая и антикоррозийная присадка;

– цинка (Zn) – противоизносная ZDDP и антиоксидантная присадка.

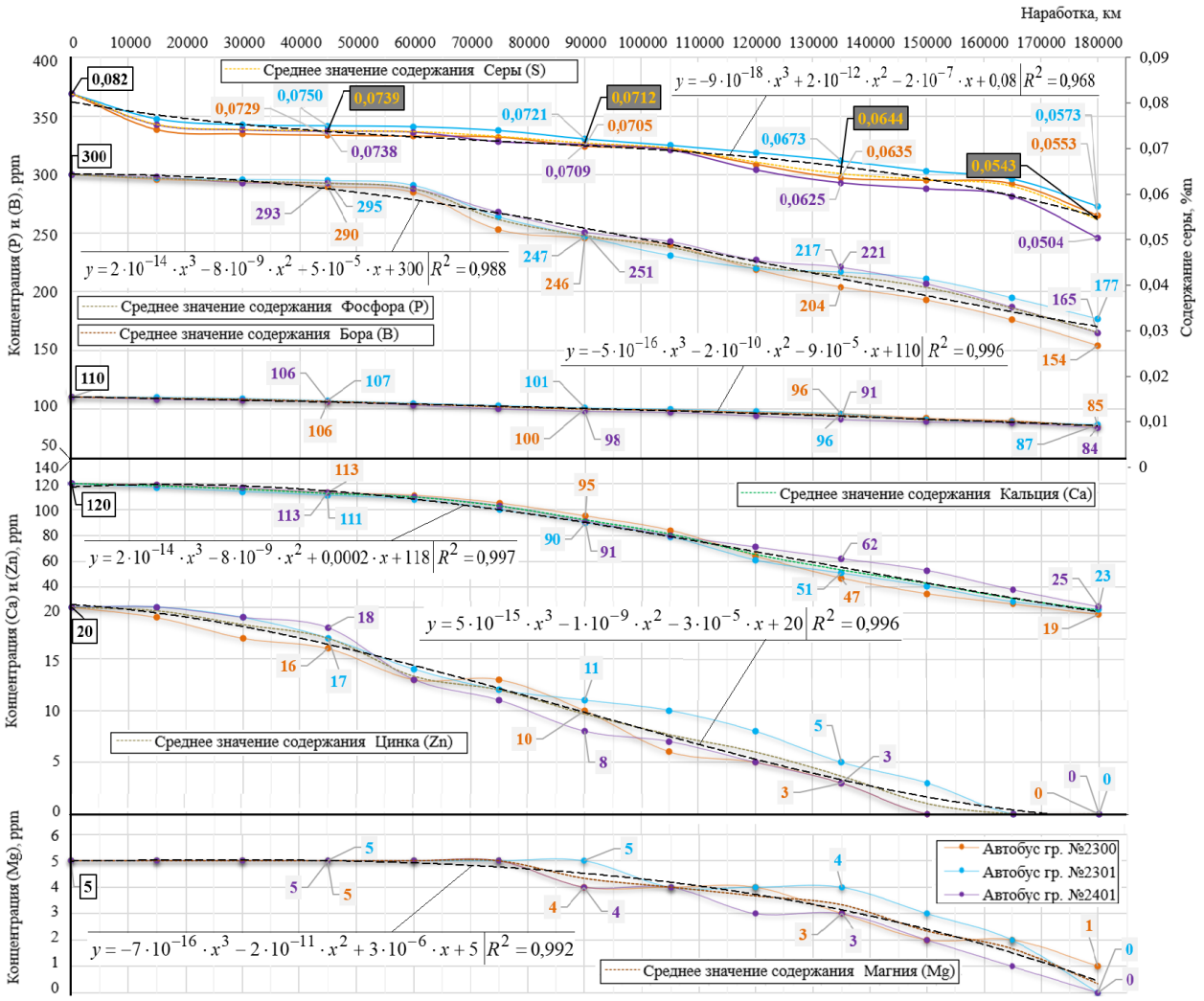


Рисунок 3.16 – Изменение концентрации активных элементов присадок в СМ в процессе наработки исследуемого объекта

Браковочные нормы выше рассмотренных основных рецептурных элементов присадок для СМ ГМКП [5]: фосфор (P) – 100 ppm; сера (S) – 0,045 %m; кальций (Ca) – 25 ppm; бор (B) – 50 ppm.

Исследования динамики показали, что активное снижение концентрации присадок начинается после 90 000 км эксплуатации. Наиболее быстро истощаются магний (Mg) и цинк (Zn), а полностью они были истощены к 180 000 км наработки. Концентрации других активных элементов к концу ресурсных испытаний в среднем истощились следующим образом [86]:

– фосфор (P): минус 45%;
– сера (S): минус 34%;

– бор (B): минус 22%;

– кальций (Ca): минус 81%.

Кальций достигает уровня выбраковочных норм (25 ppm), остальные элементы остаются в пределах допустимых значений. Коэффициент вариации истощения равен 6%, что подтверждает стабильность и однородность наблюдаемой динамики.

Изменение состава СМ в процессе эксплуатации также наглядно подтверждается сопоставлением инфракрасных спектров, полученных методом инфракрасной спектроскопии в рамках проведенного исследования.

Результаты сопоставления инфракрасных спектров СМ без наработки и использованного в процессе эксплуатации исследуемого объекта представлены на рисунке 3.17.

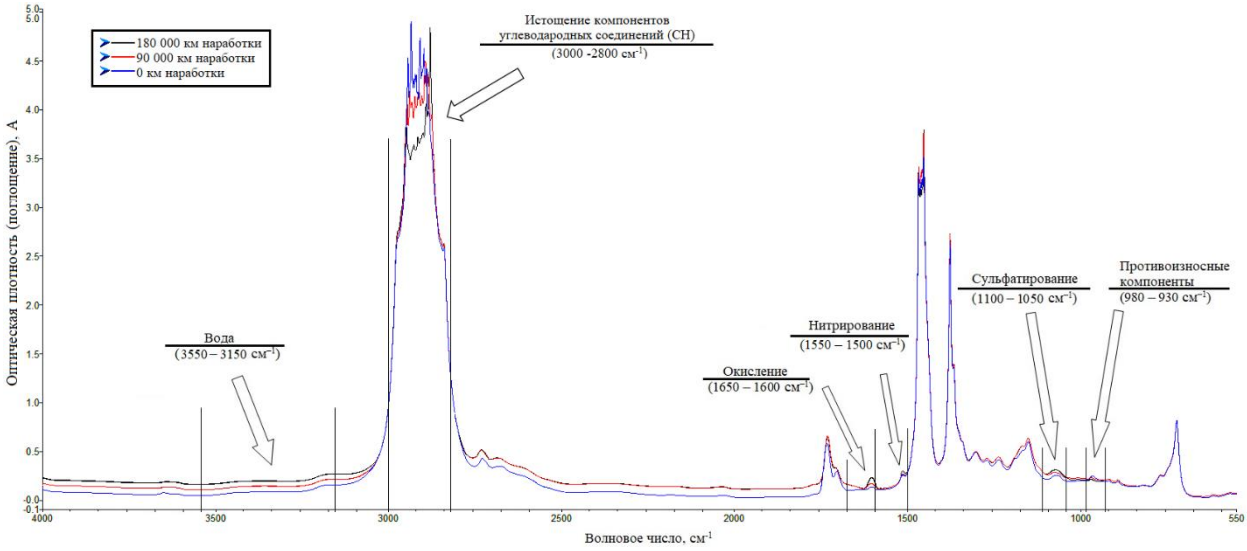


Рисунок 3.17 – Результаты сопоставления инфракрасных спектров СМ без наработки и использованного в процессе эксплуатации исследуемого объекта

Анализ исследуемого СМ в ходе подконтрольных испытаний методом инфракрасной спектроскопии позволил оценить уровень его загрязнения и степень старения. На графике спектра можно наблюдать накопление воды в СМ, истощение противоизносных присадок, а также накопление элементов, связанных с протекающими химическими процессами, такими как окисление, нитрирование и сульфатирование, в процессе эксплуатации СМ [105].

Для графической визуализации различий в инфракрасных спектрах СМ после разной степени наработки, отбирались спектры проб по максимальным индикаторным точкам отличия. Эти точки характеризуют процесс «старения» СМ по сравнению с новым. Данные точки отличия отмечены на рисунке 2.16.

Установлено, что к пробегу 180 000 км истощение присадок достигает 50 %, наиболее интенсивно – на интервале 90 000–180 000 км. Это вызывает критический рост концентрации железа (Fe) и алюминия (Al) вследствие снижения кинематической вязкости и ухудшения смазочных свойств.

По результатам экспериментальных исследований установлены следующие зависимости изменения ФХ параметров работающего СМ ГМКП:

1. параметры, характеризующие состояния СМ, $x \in [0;180000]$:

кинем. вяз. при 100°С: $y = -1 \cdot 10^{-15} \cdot x^3 + 1 \cdot 10^{-10} \cdot x^2 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot x + 10{,}16$.

кинем. вяз. при 40°С: $y = -7 \cdot 10^{-15} \cdot x^3 + 6 \cdot 10^{-10} \cdot x^2 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot x + 56{,}69$.

общее кислотное число: $y = -1 \cdot 10^{-16} \cdot x^3 + 1 \cdot 10^{-10} \cdot x^2 - 6 \cdot 10^{-6} \cdot x + 0{,}69$.

плотность при 15˚С: $y = -6 \cdot 10^{-16} \cdot x^3 + 7 \cdot 10^{-10} \cdot x^2 - 8 \cdot 10^{-5} \cdot x + 838{,}72$.

температура вспышки: $y = -4 \cdot 10^{-15} \cdot x^3 + 5 \cdot 10^{-10} \cdot x^2 - 2 \cdot 10^{-4} \cdot x + 233.$

температура застывания: $y = 1 \cdot 10^{-14} \cdot x^3 - 2 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot x + 53.$

2. параметры химического состава СМ (накапливаемых или расходуемых химических элементов) , $x \in [0;180000]$:

– химические элементы износа (частицы материалов пар трения системы):

Алюминия (Al): $y = 2 \cdot 10^{-15} \cdot x^3 - 2 \cdot 10^{-10} \cdot x^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot x + 0{,}88.$

Железа (Fe): $y = 8 \cdot 10^{-14} \cdot x^3 - 2 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 + 2 \cdot 10^{-3} \cdot x.$

Меди (Cu): $y = -3 \cdot 10^{-15} \cdot x^3 + 6 \cdot 10^{-10} \cdot x^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot x - 0{,}54.$

Содер. тв. нерас. осадка: $y = -3 \cdot 10^{-15} \cdot x^3 + 6 \cdot 10^{-10} \cdot x^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot x - 0{,}54.$

– химические элементы загрязнения (частицы внешней и смежной технической среды, проникающие в триботехническую систему):

Натрия (Na): $y = 7 \cdot 10^{-16} \cdot x^3 - 2 \cdot 10^{-10} \cdot x^2 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot x$.

Кремния (Si): $y = 9 \cdot 10^{-16} \cdot x^3 - 8 \cdot 10^{-11} \cdot x^2 + 7 \cdot 10^{-5} \cdot x$.

Содержание воды: $y = 2 \cdot 10^{-16} \cdot x^3 - 4 \cdot 10^{-11} \cdot x^2 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot x$.

– химические элементы присадок (рецептурные химические элементы характеризующие свойства и состояние СМ):

Содержание серы: $y = -9 \cdot 10^{-18} \cdot x^3 + 2 \cdot 10^{-12} \cdot x^2 - 2 \cdot 10^{-7} \cdot x + 0{,}08$.

Фосфор (P): $y = 2 \cdot 10^{-14} \cdot x^3 - 8 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot x + 300$.

Бор (B): $y = -5 \cdot 10^{-16} \cdot x^3 - 2 \cdot 10^{-10} \cdot x^2 - 9 \cdot 10^{-5} \cdot x + 110$.

Кальций (Ca): $y = 2 \cdot 10^{-14} \cdot x^3 - 8 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot x + 118$.

Цинк (Zn): $y = 5 \cdot 10^{-15} \cdot x^3 - 1 \cdot 10^{-9} \cdot x^2 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot x + 20$.

Магний (Mg): $y = -7 \cdot 10^{-16} \cdot x^3 - 2 \cdot 10^{-11} \cdot x^2 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot x + 5$.

Зафиксированные значения достижения браковочных норм ФХ ПРСМ ГМКП входе подконтрольных испытаний представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Зафиксированные значения достижения браковочных норм ФХ ПРСМ ГМКП входе подконтрольных испытаний

Параметр	Браковочная норма *	Регл. наработка до замены СМ, км	Ср. значение параметра при достижении выбрак. наработки	Наработка до выбрак. значения, км
1. Состояние				
Кинематическая вязкость при 100 ºС, мм^2/с	не менее 9	180 000	9,07	105 000
Кинематическая вязкость при 40 ºС, мм^2/с	не менее 50	180 000	48,98	120 000
Индекс вязкости	не менее 165	180 000	164	75 000

Параметр	Браковочная норма *	Регл. наработка до замены СМ, км	Ср. значение параметра при достижении выбрак. наработки	Наработка до выбрак. значения, км
Общее кислотное число, мгКОН/г	< 3	180 000	3,39	180 000
Коррозионная активность, балл	1a	180 000	1b	135 000
2. Загрязнение				
Содержание воды (КФ), %	< 0,3	180 000	0,319	180 000
3. Индикаторы износа деталей				
Содержание нерастворимых твердых осадков, % масс	≤0,03	180 000	0,032	165 000
Концентрация железа (Fe)	≤ 60 ppm	180 000	64	60 000
Концентрация алюминия (Al)	≤ 20 ppm	180 000	21	90 000
Концентрация меди (Cu)	≤ 20 ppm	180 000	22	105 000
4. Состояние концентрации присадок				
Концентрация кальция (Ca)	≥ 25 ppm	180 000	22	180 000

* Нормы установлены на основе анализа литературных данных [3, с. 156-160; 5, с. 674-678; 6, с. 112-115; 26, с. 88-92; 98]

Также была проведена оценка состояния внешнего вида масляной капельной пробы в процессе подконтрольных испытаний. Оценка проведена по отобранным пробам СМ, демонстрирующих максимальную степень различия в однородности и цветовом оттенке капельной пробы.

Изменение состояния цветового тона (внешнего вида) СМ в процессе подконтрольных эксплуатационных испытаний ГМКП представлена в приложении Т.

В ходе анализа полученной цветовой таблицы изменения состояния исследуемого СМ была разработана классификация, интерпретирующая изменения цветового оттенка СМ в процессе его наработки.

Классификация изменения состояния цветового тона (внешнего вида) СМ ГМКП в процессе наработки представлена в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Классификация изменения состояния цветового тона (внешнего вида) СМ ГМКП в процессе наработки

Класс	Наработка, тыс. км	Степень изменения	Описание
1	0	-	А) Светло-прозрачный цвет с желтоватым подтоном. Прозрачность 100%.
2	15-30	Незначительное потемнение	А) Светло-желтый цвет с более насыщенным желтоватым оттенком. Прозрачность 90%.
3	45-60	Умеренное потемнение	А) Желтый цвет с бледно-черным подтоном Прозрачность 80%.
	75		Б) Желтый цвет с темно-черным оттенком. Умеренная прозрачность 60-50%.
4	90-105	Сильное потемнение	А) Темно-желтый цвет. Слабая прозрачность 45-35%.
	120-135		Б) Темно-желтый цвет с рыжеватым подтоном. Плохая прозрачность 25-15%.
	150		В) Бледно-желтый цвет с оттенком темно-коричневого с едва заметным темно-зеленым подтоном. Плохая прозрачность 15-10%.
5	165	Критическое потемнение	А) Темно-коричневый цвет Прозрачность отсутствует 5-0%.
	180		Б) Чёрно- коричневый цвет с тускло-бордовым пдтоном. Прозрачность отсутствует 0%.

Полученная классификация внешнего визуального состояния СМ ГМКП может служить одним из способов диагностирования ухудшения его смазочных свойств для своевременной замены СМ в процессе эксплуатации.

Для оценки значимости исследованных параметров СМ проведен анализ их корреляционной взаимосвязи и сенситивной характеристики – интенсивности изменения параметров по чувствительности к наработке СМ в процессе эксплуатации агрегата. Анализ заключался в определении критериальной важности указанных параметров для разработки метода, позволяющего обосновать рациональную периодичность ТО ГМКП.

При оценке корреляционной взаимосвязи в качестве критерия фильтрации анализируемых ФХ параметров был принят предел значения коэффициента корреляции ($> |0{,}95|$). Так как корреляция более 0,95

свидетельствует о наличии крайне тесной связи между целевым параметром (наработка СМ) и искомым значимым ФХ ПРСМ. Следовательно, такие параметры являются ключевыми детерминантами исследуемого процесса и обладают максимальной прогностической способностью [66].

Анализ сенситивной характеристики выполнен по оценке значений относительной интенсивности темпов прироста (сенситива) каждого параметра в процессе наработки агрегата для каждого периода отбора проб СМ.

Результаты корреляционной взаимосвязи исследуемых ФХ параметров, представленных в приложении М. Для ФХ параметров, имеющих наибольшую степень корреляционной связи проведена оценка их сенситивной характеристики.

Сенситивная оценка параметра определяется по формуле [99–102]:

$$\lambda = \left| \frac{\left(\frac{y_i - y_0}{y_0} \right)}{\left(\frac{x_i - x_0}{x_0} \right)} \right|, \tag{3.1}$$

где y_0, y_i – первоначальное и текущее значение диагностического параметра СМ;

x_0, x_i – первоначальное и текущее значение параметра наработки СМ.

График сенситивной оценки параметров СМ, имеющих наибольшую степень корреляционной связи с наработкой СМ в процессе эксплуатации ГМКП представлен на рисунке 3.18.

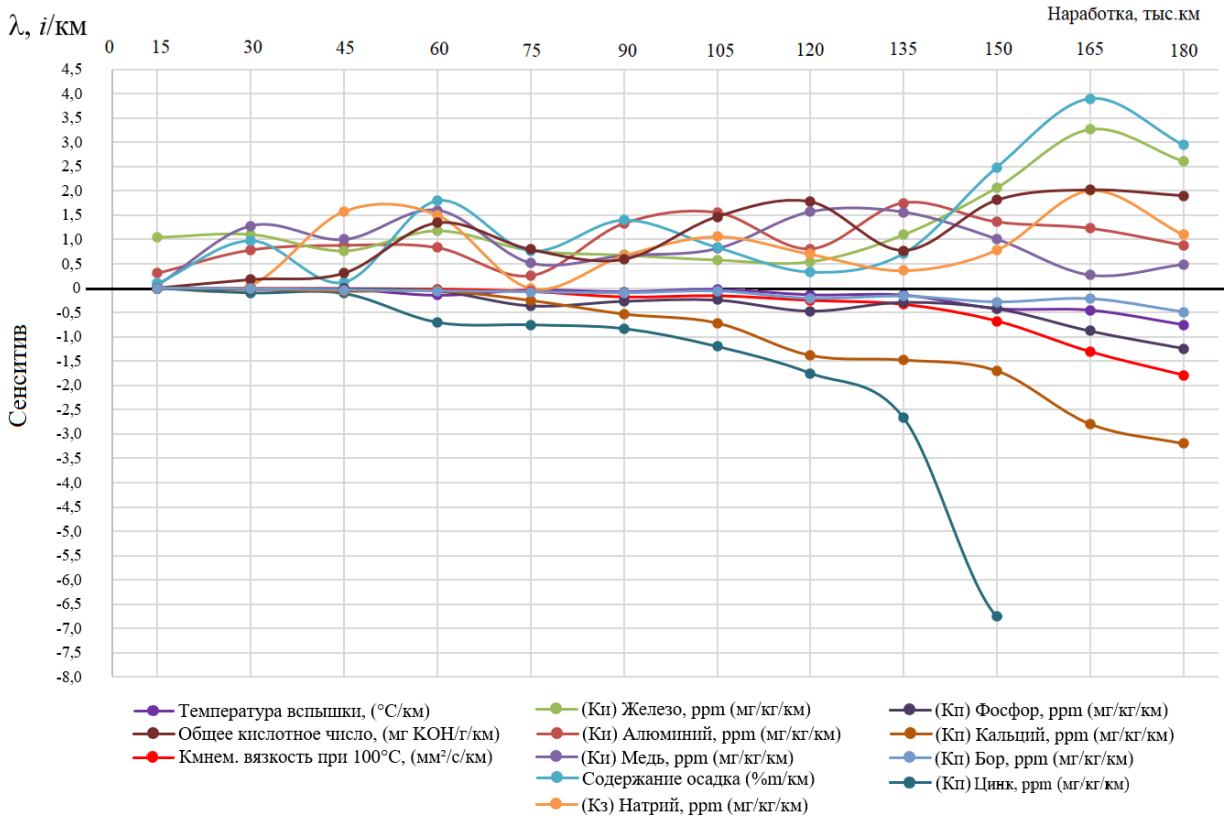


Рисунок 3.18 – График сенситивной оценки параметров СМ, имеющих наибольшую степень корреляционной связи с наработкой СМ в процессе эксплуатации ГМКП

Анализ сенситивной оценки показал, что из всего комплекса параметров, имеющих наибольшую степень корреляционной связи с наработкой ГМКП, относительная чувствительность при наработке наиболее выражена после периода приработки у следующих параметров:

– кинематическая вязкость при 100°С;

– концентрация химического элемента железа (Fe) – как индикатор износа пар трения;

– концентрация химического элемента кальция (Ca) из рецептурного компонента присадок – как индикатор ухудшения моюще-диспергирующих свойств.

Следовательно, результаты данной оценки позволили выявить наиболее значимые параметры СМ, что подтверждается результатами других исследователей в данной области. Таким образом, для определения

рациональной периодичности ТО исследуемого агрегата могут быть применены обоснованные диагностические параметры.

Следует отметить, что для фильтрации параметров концентрации состава химических элементов расходуемых присадок необходимо основываться на их изначальной концентрации, а для накапливаемых химических элементов частиц износа пар трения и внешних загрязнителей – на конечной концентрации за весь период подконтрольных испытаний.

Для установления и обоснования предельных значений параметров СМ, при которых эксплуатация ГМКП переходит в аварийную стадию, проведены исследования триботехнической системы, в которой циркулирует СМ. Триботехнические параметры (интенсивность изнашивания и коэффициент трения) обеспечивают более точную диагностическую информацию о техническом состоянии узла трения по мере наработки СМ и агрегата.

3.3 Исследования параметров триботехнической системы «металлокерамическая поверхность – смазочный материал – стальная поверхность» наименее надежного узла ГМКП при эксплуатации

Для оценки ресурса наименее надёжного узла ГМКП проведён полнофакторный эксперимент (ПФЭ) параметров указанной триботехнической системы «металлокерамическая поверхность – смазочный материал – стальная поверхность» при различной наработке СМ. Изменение состояния работающего СМ влияет на интенсивность изнашивания элементов системы, снижая ресурс агрегата и приводя к его отказу. Поэтому для объективной оценки износостойкости узла ГМКП необходим ПФЭ, учитывающий различные нагрузочные режимы и состояния СМ.

Целью эксперимента является установление зависимостей изменения параметров триботехнической системы в узле трения ГМКП. В качестве СМ или жидкостной смазке применен: Shell Spirax S6 ATF ZM, сопрягаемые пары

трения - материалы фрикционных дисков муфты сцепления первой – четвертой (А) передачи ГМКП ZF Ecolaif 1 6AP1700B при комплексном изменении ПРСМ в процессе наработки в условиях городской эксплуатации автобуса.

Объект эксперимента – пара трения при жидкостной смазке в муфте сцепления ГМКП автобуса.

Предмет эксперимента – закономерность изменения триботехнических параметров от фактического состояния ПРСМ.

Входе выполнения настоящей работы предусматривается реализация следующих задач:

1. Определить количество входных независимых - управляемых переменных (факторов), воздействующих на исследуемую систему.

2. Разработать унифицированный план проведения эксперимента для каждой пробы СМ, полученной при исследованиях физико-химических параметров в процессе подконтрольных испытаний автобусов.

3. Зафиксировать полученные значения выходных параметров исследуемой системы, согласно плану эксперимента.

4. Обработать результаты эксперимента математико-статистическим регрессионным методом для каждой пробы СМ.

В ПФЭ за оценочные показатели – триботехнические параметры исследуемой системы, принимаются: коэффициент трения и интенсивность изнашивания.

Необходимость установления данных зависимостей обоснована следующим:

1. Диагностическая способность технического состояния исследуемой системы: интенсивность изнашивания, определенная по пробам СМ, является характеристикой скорости разрушения поверхностей трения внутри исследуемой системы. Рост этого параметра свидетельствует о критическом износе или начале разрушения поверхностей сопрягаемых пар трения.

2. Оценка смазочной способности/стабильности СМ: коэффициент

трения, корреляционно характеризует скорость восстановления смазочной пленки и ее стабильность в процессе трения. Изменение этого коэффициента в сторону увеличения указывает на потерю/ нестабильность данных свойств СМ из-за изменения ФХ параметров.

В качестве системы – узла исследования в данном эксперименте является выявленное по результатам исследований первой главы диссертационной работы, наименее надежное сопряжение ГМКП – фрикционные диски муфты сцепления первой – четвертой передачи. Триботехническая система более подробно: «фрикционная накладка диска первичного вала (фрикционный диск с внутренним зубчатым венцом) – СМ – стальная поверхность фрикционного диска вторичного вала (фрикционный диск с наружным зубчатым венцом)». Материалы трения (металлокерамический материал на основе графита и сталь Ст45).

Рабочий диапазон коэффициента трения для исследуемой системы, характеризующий нормальную работу сопряжения до отказа, варьируется от 0,005 до 0,007 [103]. Превышение данного значения более 0,009 приводит к снижению ресурс исследуемой системы [103].

Кинематическая схема ГМКП ZF Ecolaif 1 6AP1700B представлена на рисунке 3.19.

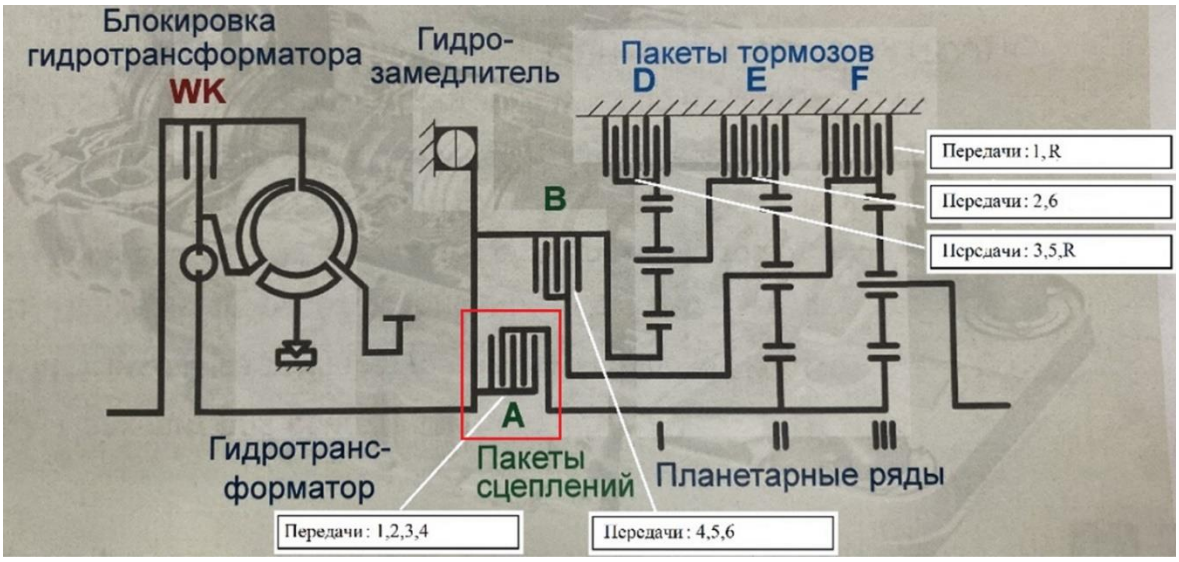


Рисунок 3.19 – Кинематическая схема ГМКП ZF Ecolaif 1 6AP1700B

В гидромеханической коробке передач ZF Ecolaif 1 6AP1700B применяются многодисковые муфты сцепления с фрикционными дисками. Диски имеют одностороннее мульти-сегментарное фрикционное покрытие из металлокерамического материала на основе графита.

Тип фрикционных дисков ГМКП ZF Ecolaif 1 6AP1700B представлен на рисунке 3.20.



Рисунок 3.20 – Тип фрикционных дисков гидромеханической коробке передач ZF Ecolaif 1 6AP1700B

Фрикционные диски муфты сцепления (первой – четвертой передач) ГМКП ZF Ecolaif 1 6AP1700B представлены на рисунке 3.21.

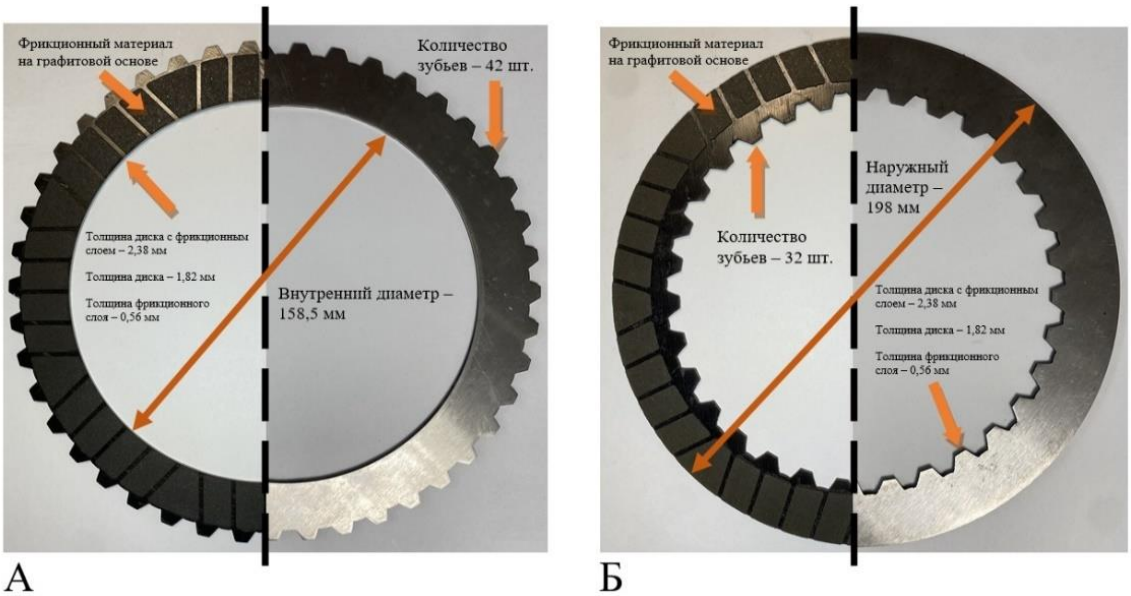


Рисунок 3.21 – Фрикционные диски муфты сцепления (первой – четвертой передач) ГМКП ZF Ecolaif 1 6AP1700B

А – фрикционный диск вторичного вала «ведомый» (с наружным зубчатым венцом)

Б – фрикционный диск первичного вала «ведущий» (с внутренним зубчатым венцом)

Основные размерные параметры толщины фрикционного диска [104]:

1. Толщина диска с фрикционным слоем: ~ 2400 мкм.
2. Толщина диска: ~ 1800 мкм.
3. Толщина слоя фрикционного материала, (H_0): ~ 600 мкм.
4. Предельный допустимый износ слоя фрикционного материала ($H_{пред.}$): 0 ÷ 200 мкм.
5. Браковочная толщина износа слоя фрикционного материала при дефектовки: 250 мкм.

Исследования триботехнических параметров были проведены на базе машины трения модели 2070 СМТ-1, согласно методике выбранного типа сопряжения контактирующих пар трения.

Выбранный тип сопряжения контактирующих пар трения – «Ролик-Колодка-СМ».

Общий вид машины трения 2070 СМТ-1 представлен на рисунке 3.22.



Рисунок 3.22 – Общий вид машины трения 2070 СМТ-1

Элементы настройки и измерения машины трения 2070 СМТ-1 представлена на рисунке 3.23 [63].

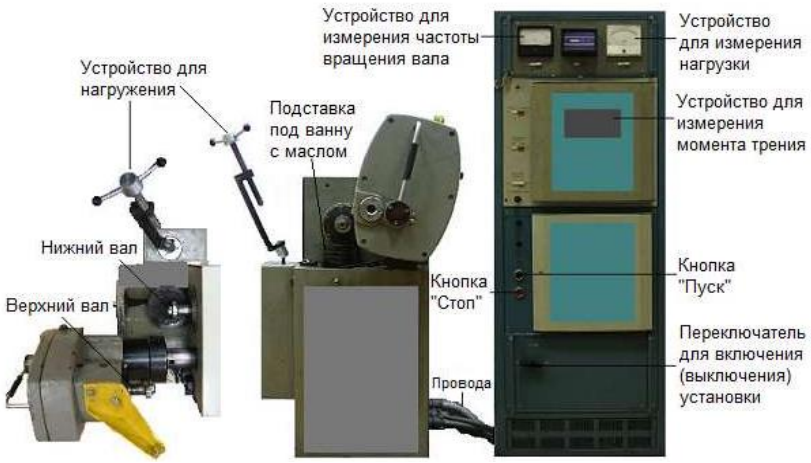


Рисунок 3.23 – Элементы настройки и измерения
машины трения 2070 СМТ-1

Указатель частоты вращения, n, имеет предел измерения: от 75 до 1500 мин$^{-1}$, с погрешностью измерения ±3%. Диапазон измерения нагрузочных усилий, P, на образцы составляет $(200 \div 5000)$ Н [63].

Форма и размер образцов контактной пары выбирают в зависимости от типа используемых для испытания машин и выбранной моделирующей схемы узла трения, которая обеспечит соответствие контактной пары трения натурному узлу исследуемого механизма.

Схема сопряжения контактной пары трения «ролик – колодка – смазочный материал» представлена на рисунке 3.24.

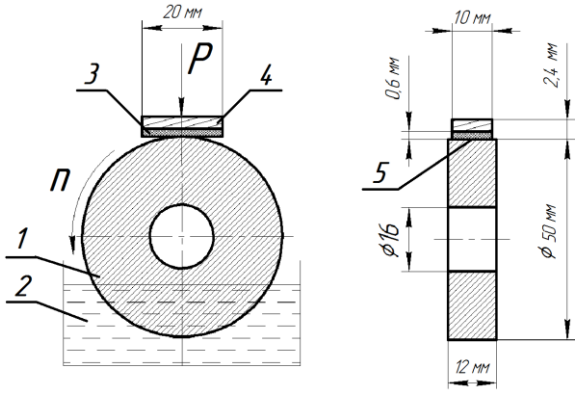


Рисунок 3.24 – Схема сопряжения контактной пары трения:
«ролик – колодка – смазочный материал»

1 – ролик; 2 – смазочный материал (жидкость); 3 – фрикционный материал колодки;
4 – стальная основа колодки; 5 – место контакта трения

Для обеспечения соответствия пары трения натурному узлу по кинематическому признаку в качестве неподвижного элемента была выбрана колодка, представляющая собой часть фрикционного диска первичного вала. В качестве вращающегося элемента использован ролик из стали 45, который имитирует стальную поверхность фрикционного диска вторичного вала, менее подверженную износу. Ролик имитирует контакт трения с фрикционным металлокерамическим материалом диска первичного вала в момент включения и сжатия муфты. Данное решение было принято на основании результатов дефектовки исследуемого агрегата в процессе анализа его эксплуатационной надежности.

Образец колодки (часть фрикционного диска сцепления вторичного вала) представлен на рисунке 3.25.

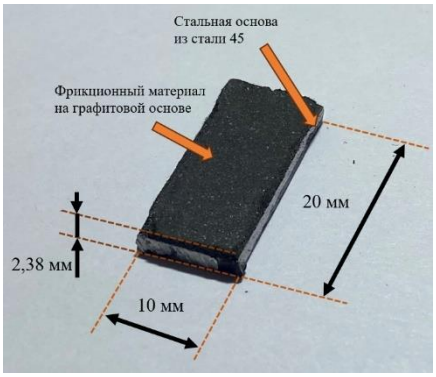


Рисунок 3.25 – Образец колодки
(часть фрикционного диска сцепления вторичного вала)

Условия эксперимента были приближены к эксплуатационным – к реальным условиям работы фрикционной муфты при её включении.

Методика проведения эксперимента соответствовала стандартному методу испытаний, предусмотренному для машины трения модели 2070 СМТ-1 при реализации типа сопряжения «Ролик-Колодка-СМ» и заключалась в следующем.

Стальной ролик марки стали 45 устанавливается на шпиндель машины трения, колодка, сделанная из фрикционного диска, закрепляется с помощью винтов в держателе. Подаваемая нагрузка выставлялась и тарировалась

динамометром. Радиальное биение ролика не превышало 10 мкм. Контактная пара деталей трения «ролик-колодка» находилась в резервуаре с исследуемым СМ.

Момент трения, M_T, регистрировался с помощью бесконтактного индуктивного датчика, встроенного в кинематическую схему машины трения. Диапазон измерения от 1 до 20 Н·м с погрешностью измерения ±1% [63]. Испытания проводились на установленных режимах работы машины согласно плану эксперимента.

Износ, $И$, фиксировался микрометрированием колодки. Индикаторным микрометром производились контрольные замеры в трех точках, в центре и по краям колодки с погрешностью измерения ±1 мкм, при этом износ определялся как среднеарифметическое значение всех измерений.

Перед проведением серий опытов эксперимента необходимо было разработать план проведения ПФЭ, который позволил бы определить, какая регрессионная модель наиболее адекватно описывает функциональную зависимость в исследуемом процессе:

$$M_m = f(P,n). \tag{3.2}$$

$$И = f(P,n). \tag{3.3}$$

При построении регрессионной модели - функций отклика момента трения и интенсивности изнашивания от нагрузки и частоты вращения при различной степени изменений ФХ параметров исследуемого СМ использовалась математическая полиномиальная модель [105]:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ j \neq i}}^{k} \beta_{ij} x_i x_j, \tag{3.4}$$

где $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ – теоретические коэффициентами регрессии;

x_i, x_j – факторы (входные параметры);

η – реакция модели (выходной параметр).

По результатам эксперимента выявлялись коэффициенты (b_0, b_1, b_2, b_{12}...), которые являются оценками теоретических коэффициентов. Вид экспериментальной математической полиномиальной модели:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 = b_0 + b_1 \cdot P_i + b_2 \cdot n_i + b_{12} \cdot P_i \cdot n_i, \quad (3.5)$$

где $\hat{y}$ – расчетное значение реакции математической модели (выходного параметра).

Из формулы (3.4) видно, что планирование эксперимента связано с математическим языком – алгебраических (полиноминальных) моделей. Прежде, чем приступить к проведению эксперимента и построению математической модели, необходимо последовательно решить следующие задачи:

1. Выбрать выходной критерий (или критерии) реакции математической модели ($\hat{y}$);

2. Выбрать независимые переменные (x_i) – факторы;

3. Вычислить коэффициенты регрессии (b_i);

4. Определить метод оценки параметров регрессии;

5. Определить вид функции отклика и планирования.

Выходной критерий реакции математической модели – нижнее значение: коэффициента трения, $f_{T\min}$, и интенсивности изнашивания $I_{И\min}$, мкм/км.

Независимые-управляемые переменные, k, (факторы, воздействие которых на объект исследования можно изменятьцеленаправленно), частота вращения ролика, n, мин$^{-1}$, и значение нагрузки на ролик P, Н, равной силе сжатия фрикционных дисков влияющей на их износ в процессе эксплуатации ГМКП. В эксперименте факторы – частота вращения и нагрузка участвуют в дискретном исполнении, и поэтому корреляционной связи между их параметрами не существует. Следовательно, количество независимых-управляемых факторов в эксперименте, $k = 2$.

Число опытов, N, в принятой двухуровневой системе измерений

факторного пространства, в котором экспериментально необходимо определить значение функции отклика (3.1) и (3.2) определяется по формуле [105]:

$$N = 2^k, \tag{3.6}$$

где k – число независимых переменных (факторов).

При проведении эксперимента уровни факторов кодировались по формуле [105]:

$$x_{i\ код.} = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \tag{3.7}$$

где $x_{i\ код.}$ – кодовое значение i-го фактора;

x_i – натуральное текущее значение i-го фактора;

x_{i0} – начальный (нулевой) уровень i-го фактора;

Δx_i – интервал варьирования (изменения) i-го фактора;

Интервал варьирования i-го фактора определяется по формуле [105]:

$$\Delta x_i = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{2}, \tag{3.8}$$

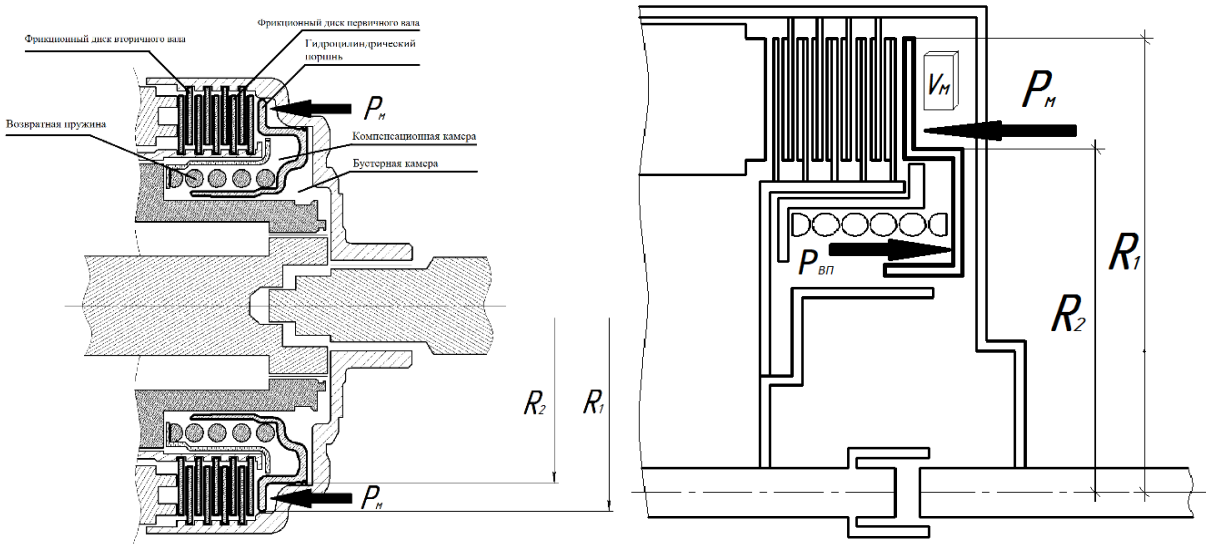
где $x_{i\max}$ – верхний уровеньi-го фактора;

$x_{i\min}$ – нижний уровеньi-го фактора.

Определение номинальных значений независимых переменных для проведения эксперимента.

Схема исследуемого натурального узла трения представлена на рисунке 3.26.

Номинальные значения нагрузки, P, подаваемой на ролик по исследуемой схеме контактной пары трения, равны силе сжатия фрикционных дисков, $P_{сф}$, в процессе включения муфты сцепления «А» ($P = P_{сф}$).



a b

Рисунок 3.26 – Схема исследуемого натурального узла трения

a – конструктивная схема; b – кинематическая схема;

R_1 – внешний радиус гидроцилиндрического поршня; R_2 – внутренний радиус поршневой плоскости, воспринимающей давление СМ; $P_м$ – рабочее давление СМ, подаваемое для включения муфты; $V_м$ – рабочий объем СМ под давлением.

Сила сжатия фрикционных дисков гидроцилиндрическим поршнем, $P_{сф}$, Н, определяется по формуле [106]:

$$P_{сф} = P_{дп} - P_{вп}, \tag{3.9}$$

где $P_{дп}$ – сила действия гидроцилиндрического поршня, равная силе давления рабочей жидкости на поршневую плоскость воспринимающей давление жидкости, Н;

$P_{вп}$ – сила возвратной пружины, Н.

Сила действия гидроцилиндрического поршня, $P_{дп}$, Н, определяется по формуле [107, 108]:

$$P_{дп} = p \cdot S_{гп}, \tag{3.10}$$

где p – давление рабочей жидкости, МПа;

$S_{гп}$ – площадь поршневой плоскости воспринимающей давление

рабочей жидкости, мм^2.

Давление СМ, подаваемое для включения муфты сцепления «А» ГМПК, варьируется $(0{,}6 \div 0{,}7)$ МПа.

Площадь поршневой плоскости воспринимающей давление рабочей жидкости, $S_{гп}$, мм^2, определяется по формуле [107]:

$$S_{гп} = \frac{(d_1^2 - d_2^2) \cdot \pi}{4}, \tag{3.11}$$

где d_1 – внешний диаметр гидроцилиндрического поршня, мм;

d_2 – внутренний диаметр поршневой плоскости, воспринимающей давление СМ, мм.

Сила возвратной пружины, $P_{вп}$, Н, определяется по формуле [109]:

$$P_{вп} = \frac{G \cdot d^4 \cdot f_x}{8 \cdot D_0^3 \cdot n''} = \frac{G \cdot d^4 \cdot (H_0 - H_1)}{8 \cdot (D_1 - d)^3 \cdot n}, \tag{3.12}$$

где G – модуль упругости при сдвиге;

d – диаметр пружинной проволоки;

f_x – абсолютная линейная деформация пружины;

H_0 – длина пружины в ненагруженном (свободном) состоянии;

H_1 – длина пружины в нагруженном состоянии;

D_0 – средний диаметр пружины;

D_1 – наружный диаметр пружины;

n'' – число рабочих витков пружины.

Исходные данные и результаты вычислений силы сжатия фрикционных дисков муфты сцепления – нагрузки сжатия «ролик – колодка» при проведении ПФЭ приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Исходные данные и результаты вычислений силы сжатия фрикционных дисков муфты сцепления – нагрузки сжатия «ролик – колодка» при проведении ПФЭ

Данные	Параметр		Ед. изм.	Значение
Исходные	Давление рабочей жидкости		МПа	0,6/0,7
	Внешний радиус гидроцилиндрического поршня, R_1		мм	98
	Внутренний радиус поршневой плоскости, воспринимающей давление СМ, R_2		мм	84,7
	Диаметр пружинной проволоки, d		мм	9
	Длина пружины в ненагруженном (свободном) состоянии, H_0		мм	100
	Длина пружины в нагруженном состоянии, H_1		мм	50
	Наружный диаметр пружины, D_1		мм	128
	Полное число витков пружины, n'		шт.	4
	Число рабочих витков пружины, n''		шт.	2
	Модуль упругости пружины при сдвиге, G		кгс/мм^2	8000
Расчетные	Площадь поршневой плоскости воспринимающей давление рабочей жидкости, $S_{гп}$		мм^2	7630
	Сила возвратной пружины, $P_{вп}$		Н	955
	Сила действия гидроцилиндрического поршня, $P_{дп}$		Н	4578/5341
	Сила сжатия фрикционных дисков, $P_{сф}$	расчетные	Н	3623/4386
		принятые для эксперимента		3630/4390

Номинальные значения частоты вращения ролика определяется по частоте вращения процесса включения муфты сцепления «А» ГМКП, при котором фрикционные диски подвержены износу, принимаются согласно руководству по эксплуатации ГМКП ZF-Ecolife и собранной статистики работы ГМКП в процессе проведенных подконтрольных эксплуатационных испытаний трансмиссионного СМ.

Частота вращения, *n*, активации муфты сцепления «А» работающей в комбинации с тормозными муфтами при включении первой, второй, третьей и четвертой передачи, составляет $(650 \div 700)$ мин$^{-1}$ [104].

Основные характеристики плана проведения ПФЭ представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Основные характеристики плана проведения ПФЭ

Значение независимых управляемых факторов	Кодовое обозначение	Частота вращения, мин$^{-1}$.	Нагрузка, Н.
		X_1	X_2
Основной уровень	0	675	4010
Верхний уровень	+1	700	4390
Нижний уровень	–1	650	3630
Интервал варьирования	ΔX_i	25	380

Для ведения эксперимента применен план с двухуровневой системой измерений факторов [105], согласно которому разработана матрица планирования эксперимента, в соответствии с которой проведены экспериментальные исследования. Результаты эксперимента – искомые выходные параметры исследуемой системы зафиксированы в матрице планирования.

Геометрическая интерпретация области планирования эксперимента без масштабирования представлена на рисунке 3.27.

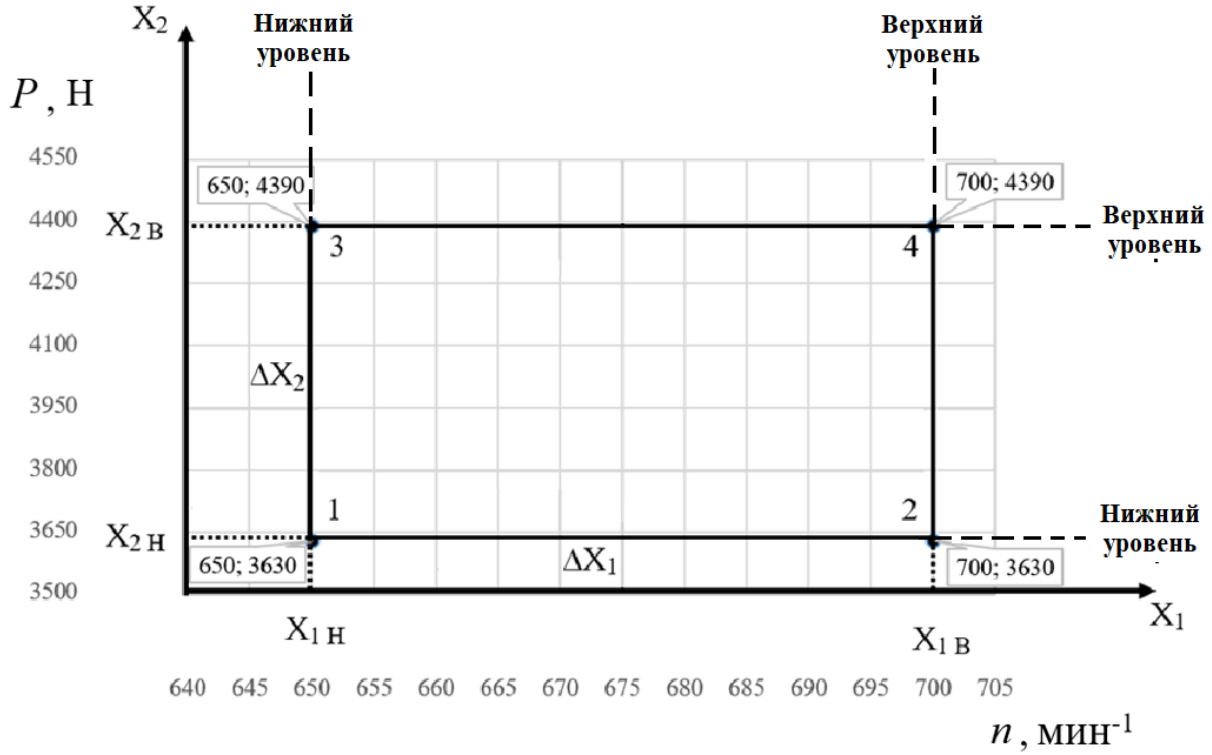


Рисунок 3.27 – Геометрическая интерпретация области планирования эксперимента без масштабирования

Графическая модель поля корреляционной связи между входными независимыми-управляемыми параметрами и выходным параметром эксперимента представлена на рисунке 3.28.

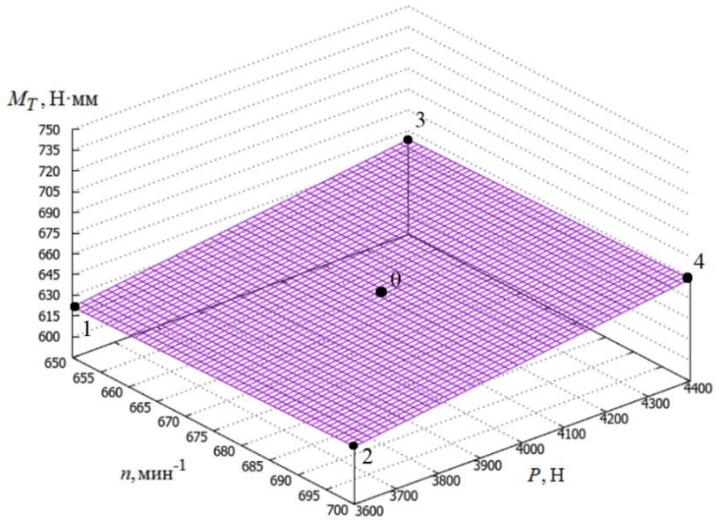


Рисунок 3.28 – Графическая модель поля корреляционной связи между входными независимыми-управляемыми параметрами и выходным параметром эксперимента

Представленная поверхность демонстрирует корреляционное поле между входными и выходными параметрами физического процесса в исследуемой системе.

Матрица планирования и результаты проведённых ПФЭ триботехнических исследований представлена в приложении У.

Рассеивание значений полученных выходных результатов проведенных экспериментов незначительно, согласно полученным значениям средних коэффициентов вариации. Следовательно, в дальнейших исследованиях принимаем, что данная совокупность выборки однородна, по условию по условию: $0{,}1 \le \upsilon_x \le 0{,}33$ [8].

Для определения критериев реакции искомых регрессионных моделей – оценочных показателей эксперимента, выполняется их расчёт по следующим формулам.

Коэффициент трения, f_T, определяется по формуле [43]:

$$f_T = \frac{P_T}{P}, \tag{3.13}$$

где P_T – сила трения, Н;

P – нагрузка, подаваемая на ролик, Н.

Сила трения, P_T, Н, определяется по формуле [43, 44]:

$$P_T = \frac{M_T}{R_p}, \tag{3.14}$$

где R_p – радиус ролика, использованного при исследовании контактной пары трения, мм.

M_T – момент трения, Н·м.

Интенсивность изнашивания по результатам эксперимента, $I_И$, мкм/км, определяется по формуле [44, 110]:

$$I_И = \frac{И}{L_T}, \tag{3.15}$$

где $И$ – линейный износ, мкм;

L_T – длина пути трения, км.

Результаты расчёта оценочных показателей проведенных ПФЭ представлены в приложении Ф.

3.4 Математические модели изменения параметров триботехнической системы «металлокерамическая поверхность – смазочный материал – стальная поверхность» при эксплуатации ГМКП

Оценка и обработка полученных выходных параметров исследуемого процесса выполнена с применением математико-статистического метода наименьших квадратов (МНК). На основе его расчётных формул, используемых в регрессионном анализе, установлены зависимости между математическим ожиданием выходного параметра и значениями варьируемых

управляемых факторов эксперимента.

Усредненное значение выходного параметра эксперимента, $\bar{y}_i$, по сериям опытов и количества подконтрольны объектов рассчитывается по формуле [105]:

$$\bar{\bar{y}}_i' = \frac{\sum_{j=1}^{m} \bar{\bar{y}}_{ij}}{m}, \tag{3.16}$$

где m – число параллельных опытов.

Для вычисления оценки погрешности выходного параметра параллельных опытов рассчитывается дисперсия, S_i^2, по формуле [105]:

$$S_i^2\{\bar{\bar{y}}_i\} = \frac{\sum_{j=1}^{m} (\bar{\bar{y}}_{ij} - \bar{\bar{y}}')^2}{m-1}. \tag{3.17}$$

Чтоб определить, возможность дальнейшего построения регрессионной математической модели, необходимо проверить гипотезу на однородность дисперсии по критерию Кохрена.

Критерий Кохрена, G_p, рассчитывается по формуле [105]:

$$G_{paac} = \frac{\max(S_i^2\{\bar{\bar{y}}_i\})}{\sum_{i=1}^{N} S_i^2\{\bar{\bar{y}}_i\}}. \tag{3.18}$$

Рассчитанное значение критерия Кохрена, G_p, сравнивают с табличным значением, знаменатель $k = N$, а числитель $f = m - 1$, при уровне значимости $\alpha = 0{,}05\%$.

При соблюдении условия (3.18), гипотеза об однородности дисперсии выполняется.

$$G_{paac} < G_{табл} \tag{3.19}$$

Определяется дисперсия воспроизводимости, $S_в^2$, соответствующая каждому значению выходного параметра опыта эксперимента по формуле [105]:

$$S_в^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} S_i^2\{\bar{\bar{y}}_i\}}{N}. \quad (3.20)$$

где N – число опытов.

Коэффициенты математической модели рассчитываются по формулам [105]:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} \bar{\bar{y}}_i'}{N}. \quad (3.21)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N} \bar{\bar{y}}_i' \cdot x_i}{N}. \quad (3.22)$$

$$b_2 = \frac{\sum_{i=j=1}^{N} \bar{\bar{y}}_i' \cdot x_j}{N}. \quad (3.23)$$

$$b_{12} = \frac{\sum_{i=j=1}^{N} \bar{\bar{y}}_i' \cdot x_i \cdot x_j}{N}. \quad (3.24)$$

Для определения ошибки коэффициентов математической модели при проведении эксперимента рассчитывается среднеквадратичное отклонение (СКО), $S\{b_k\}$, по формуле [105]:

$$S\{b_k\} = \sqrt{\frac{S_в^2}{N \cdot m}}. \quad (3.25)$$

Для определения степени влияния на значение выходного параметра математической модели при изменении значимого фактора на 1%, рассчитывается средний коэффициент эластичности фактора по формуле [105]:

$$\varepsilon = \left| b_k \cdot \frac{\bar{x}_i}{\bar{\bar{y}}_i'} \right|. \quad (3.26)$$

Проверка гипотезы о статистической значимости коэффициентов математической модели выполнятся по критерию Стьюдента, $t_{k\,p}$, по формуле [105]:

$$t_{k\,p} = \frac{|b_k|}{S\{b_k\}}. \tag{3.27}$$

Рассчитанное значение критерия Стьюдента сравнивают с табличным значением, с числом степеней свободы $f = N \cdot (m-1)$, при уровне доверительной вероятности а = 0,95.

При выполнении условия (3.27), гипотеза об статистической значимости коэффициент отвергается и данный коэффициент исключается из математической модели.

$$t_{k\,p} < t_{табл}. \tag{3.28}$$

Также коэффициенты математической модели оцениваются на значимость через коэффициент корреляции, r_{xy_i}, по формуле [105]:

$$r_{xy_i} = b_k \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x}_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(\bar{\bar{y}}_i' - \bar{\bar{\bar{y}}}_i')^2}}. \tag{3.29}$$

Коэффициент корреляции оценивает степень взаимосвязи между фактором и выходным параметром. Диапазон варьирования данного коэффициента [-1;1]. Условия значимости:

– если $r_{xy_i} = 0$, то взаимосвязь отсутствует полностью;

– если $r_{xy_i}[0{,}5;1]$, то существует сильная прямая взаимосвязь;

– если $r_{xy_i}[-0{,}5;-1]$, то существует сильная обратная взаимосвязь;

– если $r_{xy_i}[0{,}5;-0{,}5]$, то это слабые взаимосвязи и их можно не учитывать.

Проверка гипотезы об адекватности математической модели выполнятся

с помощью критерия Фишера, F_p, по формуле [105]:

$$F_{расч} = \frac{S_{ад}^2}{S_в^2}. \quad (3.30)$$

где $F_{расч}$ – рассчитанное значение критерия Фишера.

$$F_{факт} = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{N-l}{l-1}. \quad (3.31)$$

где $F_{факт}$ – фактическое значение критерия Фишера;

l – число значимых коэффициентов математической модели.

Дисперсия адекватности расчетов, $S_{ад}^2$, определяется по формуле [105]:

$$S_{ад}^2 = \frac{m}{N-l} \cdot \sum (\bar{\bar{y}}_i' - \hat{y}_i)^2. \quad (3.32)$$

где l – число значимых коэффициентов математической модели.

Рассчитанное и фактическое значение критерия Фишера сравнивают с табличным значением, числитель $k_1 = N - l$ и знаменатель $k_2 = N \cdot (m-1)$, при уровне значимости α = 0,05.

При выполнении условия (3.32) гипотеза об адекватности математической модели принимается.

$$F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}. \quad (3.33)$$

Также адекватность математической модели оценена через среднюю ошибку аппроксимации, $\Delta_{аппр}$, по формуле [105]:

$$\Delta_{аппр} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} \left| \frac{\bar{\bar{y}}_i' - \hat{y}_i}{\bar{\bar{y}}_i'} \right| \cdot 100\%. \quad (3.34)$$

Если величина данного параметра превышает $(10 \div 15\%)$, модель считается не адекватной, следовательно, необходимо увеличить число опытов или модернизировать модель [105].

Характеристика качества математической модели определена через коэффициент детерминации, R^2, по формуле [105]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (\bar{\bar{y}}_i' - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{N} (\bar{\bar{y}}_i' - \bar{\bar{\bar{y}}}_i')^2}. \qquad (3.35)$$

Согласно закону Парето, коэффициент детерминации должен составлять не менее 80% для достаточной степени качества математической модели.

Результаты регрессионного анализа изменения коэффициента трения по данным проведённых ПФЭ представлены в Приложении Х.

Выводы по регрессионному анализу значений коэффициента трения, полученных в ходе проведенных ПФЭ:

1. Полученные математические модели проверены на гипотезу однородности дисперсий выборки по критерию Кохрена. По всем моделям условие (3.19) выполняется, что и определило возможность построения математических моделей для каждого эксперимента.

2. Проверка гипотезы о статистической значимости коэффициентов математических моделей по критерию Стьюдента согласно условию (3.28), выявило два значимых коэффициента b_0 и b_2, а коэффициенты b_1 и b_{12} исключены из моделей, так как статистически они незначимы.

3. Проверка значимости основных факторных коэффициентов математических моделей b_1 и b_2 через коэффициент корреляции, характеризующий степень взаимосвязи между коэффициентом независимого-управляемого фактора и выходным параметром модели $\hat{y}_i$, подтвердил гипотезу статистической значимости.

Оценка корреляционной связи показала, что во всех математических моделях проведенных экспериментов между выходным параметром $\hat{y}_i = f_T$ и кодированным независимым-управляемым фактором x_2 (нагрузка, Н) по условиям значимости существует сильная обратная взаимосвязь, так как среднее значение коэффициента корреляции составило (- 0,98). Взаимосвязь между кодированным фактором (x_1 и $x_1 x_2$) и выходным параметром является

очень слабой, так как среднее значение коэффициентов корреляции составило: x_1 (0,20); x_1x_2 (0), поэтому математические коэффициенты коэффициенты b_1 и b_{12} исключаются и не учитываются в итоговых конструкциях математических моделей. Также проверка мультиколлинеарности подтверждает отсутствие взаимосвязи факторов x_1 и x_2.

Сильная обратная взаимосвязь между выходным параметром $\hat{y}_i = f_T$ и фактором x_2 характеризует убывание выходного параметра при росте значения фактора x_2.

4. Проверка гипотезы об адекватности математических моделей выполнена с помощью критерия Фишера. Рассчитанные и фактические значение критерия Фишера подтверждают, что каждая математическая модель проведенных экспериментов по условию (3.33) адекватна.

Также адекватность полученных математических моделей подтверждена через среднюю ошибку аппроксимации, по результатам расчётов которой величина данного параметра не превысила предельных значений ($10 \div 15\%$).

5. Качество математических моделей определено через коэффициент детерминации. Согласно закону Парето, коэффициент детерминации должен составлять не менее 80% для качественных математических моделей. Полученный средний коэффициент детерминации математических моделей проведенных экспериментов составил 92,6%.

Результаты регрессионного анализа интенсивности изнашивания по данным проведённых ПФЭ представлены в Приложении Ц.

Выводы по регрессионному анализу значений интенсивности изнашивания, полученных в ходе проведенных ПФЭ:

1. Полученные математические модели проверены на гипотезу однородности дисперсий выборки по критерию Кохрена. По всем моделям условие (3.19) выполняется, что и определило возможность построения математических моделей для каждого эксперимента.

2. Проверка гипотезы о статистической значимости коэффициентов математических моделей по критерию Стьюдента согласно условию (3.28), выявило два значимых коэффициента b_0 и b_1, а коэффициенты b_2 и b_{12} исключены из моделей, так как статистически они незначимы.

3. Проверка значимости основных факторных коэффициентов математических моделей b_1 и b_2 через коэффициент корреляции, характеризующий степень взаимосвязи между коэффициентом независимого-управляемого фактора и выходным параметром модели $\hat{y}_i$, подтвердил гипотезу статистической значимости.

Оценка корреляционной связи показала, что во всех моделях проведенных экспериментов между выходным параметром $\hat{y}_i = I_И$ и кодированным независимым-управляемым фактором x_1 (частота вращения, мин$^{-1}$) по условиям значимости существует сильная прямая взаимосвязь, так как среднее значение коэффициента корреляции составило: (- 0,92). Взаимосвязь между кодированным фактором x_2 и x_1x_2 и выходным параметром является очень слабой, так как среднее значение коэффициентов корреляции составило: x_2 (0,38); x_1x_2 (0), поэтому математические коэффициенты b_2 и b_{12} исключаются и не учитываются в итоговых конструкциях математических моделей. Также мультиколлинеарность между факторами x_1 и x_2 отсутствует.

Сильная прямая взаимосвязь между $\hat{y}_i = I_И$ и фактором x_1 характеризует увеличение значения выходного параметра при росте значения фактора x_1.

4. Проверка гипотезы об адекватности математических моделей выполнена с помощью критерия Фишера. Рассчитанные и фактические значение критерия Фишера подтверждают, что каждая математическая модель проведенных экспериментов по условию (3.33) адекватна.

Также адекватность полученных математических моделей

подтверждена через среднюю ошибку аппроксимации, по результатам расчётов которой величина данного параметра не превысила предельных значений ($10 \div 15\%$).

5. Качество математических моделей определено через коэффициент детерминации. Согласно закону Парето, коэффициент детерминации должен составлять не менее 80% для качественных математических моделей. Полученный средний коэффициент детерминации математических моделей проведенных ПФЭ составил 82,8%.

По проведенным ПФЭ и полученным результатам регрессионного-математических анализов, для триботехнического параметра – интенсивность изнашивания, была построена пространственная модель визуализации поверхностей корреляционной связи между входными независимыми-управляемыми параметрами и выходным параметром эксперимента.

Визуализация поверхностей корреляционной связи, отражающих зависимость выходного параметра – интенсивности изнашивания – от независимых-управляемых параметров ПФЭ для каждой степени наработки СМ представлена на рисунке 3.29.

Интерпретация пространственной модели. Для каждой наработки СМ построены поверхности отклика ($I_u = f(P,n)$), представляющая собой поле экспериментальных значений интенсивности изнашивания, полученных для конкретной пробы СМ в заданных режимах частоты вращения и нагружения по плану ПФЭ.

Центры построенных поверхностей характеризуют усредненную интенсивность изнашивания для каждой степени наработки СМ, которые также позволяют сопоставлять результаты экспериментов при различных стадиях наработки СМ в едином факторном пространстве.

Соединение центров формирует пространственную линию, отражающую динамику состояния триботехнической системы по мере увеличения наработки СМ, так как изменение вертикального расхождения

между поверхностями отклика при переходе от одной степени наработки к другой свидетельствует о росте интенсивности изнашивания.

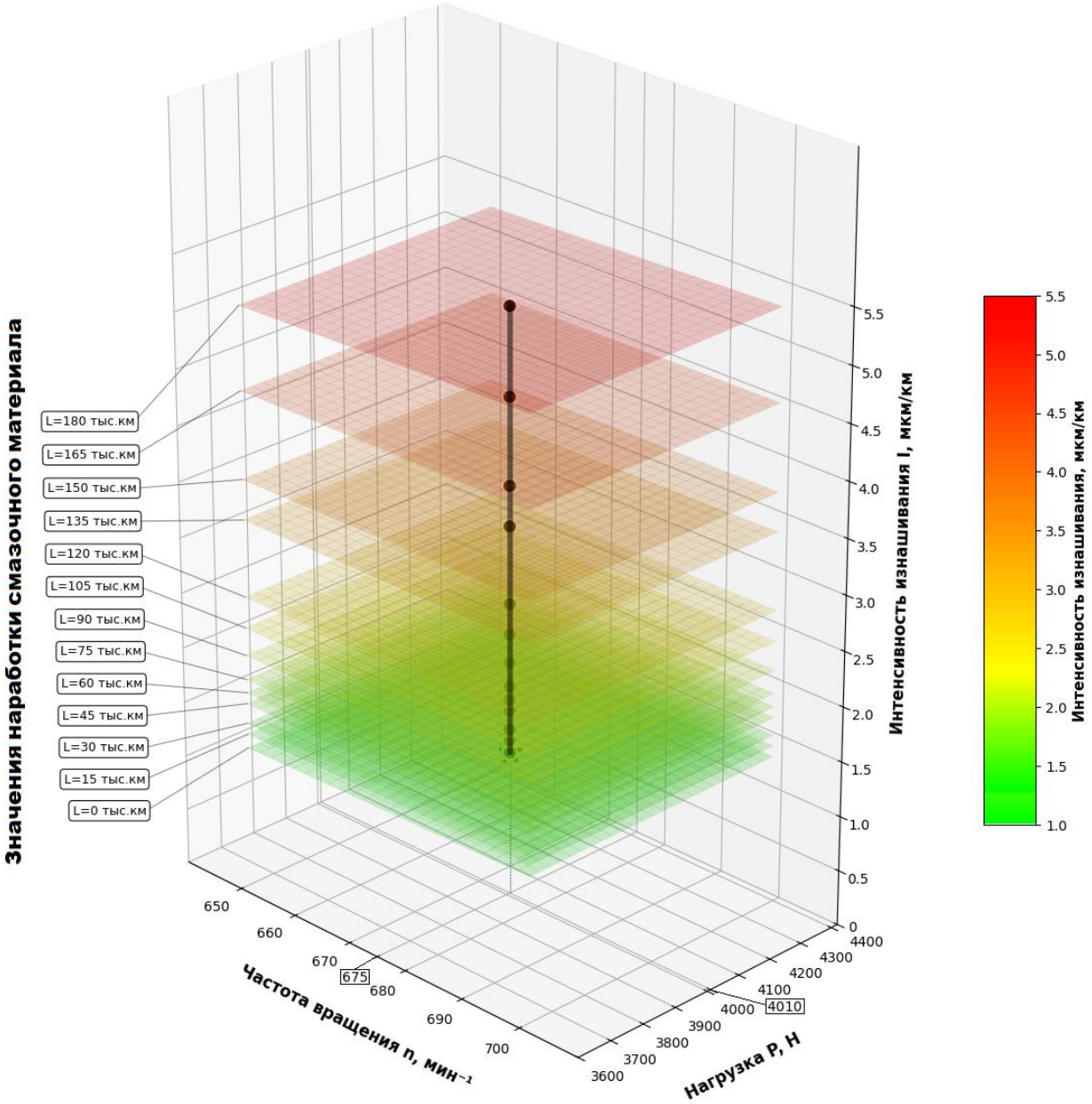


Рисунок 3.29 – Визуализация поверхностей корреляционной связи, отражающих зависимость выходного параметра – интенсивности изнашивания – от независимых-управляемых параметров ПФЭ для каждой степени наработки СМ

Таким образом, соединение центров поверхностей и анализ их взаимного расположения обеспечивают переход от дискретных экспериментальных данных к обобщенной искомой зависимости изменения интенсивности изнашивания. Данный подход служит основой для построения

адекватной математической модели исследуемого триботехнического процесса и наглядно воспринимаемой графической интерпретации выявленных закономерностей.

По результатам ПФЭ, представленных в приложениях Х и Ц, для каждой степени наработки СМ в процессе эксплуатации ГМКП установлены зависимости, характеризующие изменения триботехнических параметров от наработки СМ, z, тыс.км., в исследуемой триботехнической системе:

– коэффициент трения:

$$\hat{y} = 6{,}5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z + 5 \cdot 10^{-7} \cdot z^2 - 7 \cdot 10^{-11} \cdot z^3;\ z \in [0;180]. \quad (3.36)$$

– интенсивности изнашивания:

$$\hat{y} = 1{,}31 + 9 \cdot 10^{-3} \cdot z - 7 \cdot 10^{-5} \cdot z^2 + 8 \cdot 10^{-7} \cdot z^3;\ z \in [0;180]. \quad (3.37)$$

Зависимость изменения коэффициента трения и температуры трения от наработки СМ ГМКП представлена на рисунке 3.30.

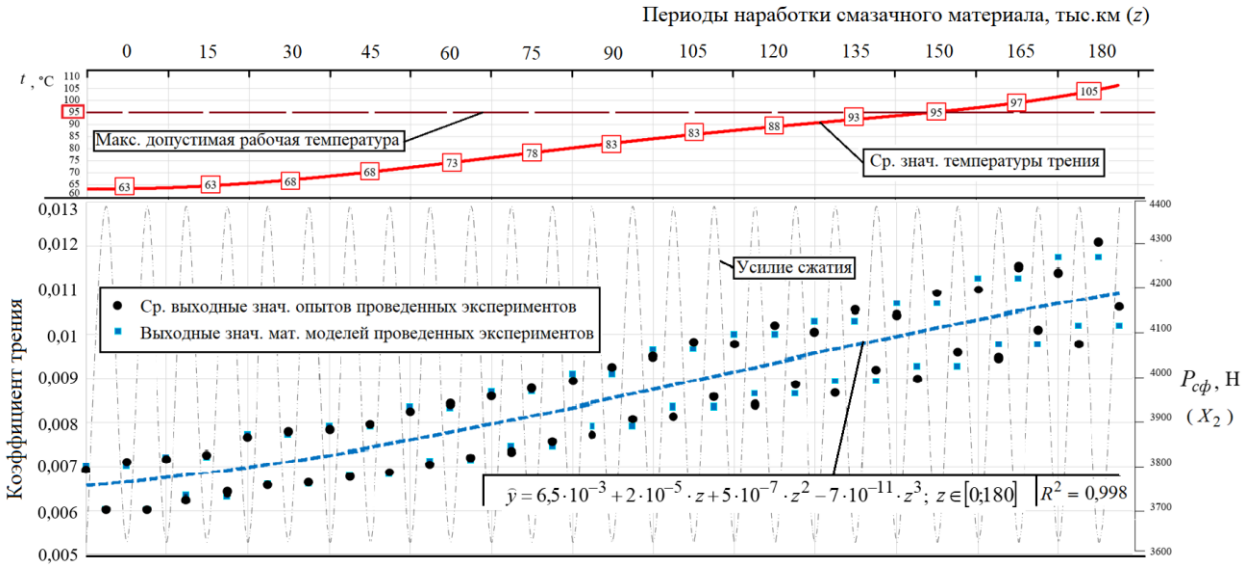


Рисунок 3.30 – Зависимость изменения коэффициента трения и температуры трения от наработки СМ ГМКП

По результатам проведенных экспериментов установлено: что предельная (критическая) норма коэффициент трения (0,009) достигнута при значении наработки – 105 000 км при эксплуатации СМ в исследуемом узле трения, что на 42% меньше регламентированной нормы.

Зависимость изменения интенсивности изнашивания от наработки СМ ГМКП представлена на рисунке 3.31.

После наработки СМ 165 000 - 180 000 км в ГМКП наблюдается резкое увеличение скорости износа. Испытания проведенные на машине трения с использованием СМ после указанной наработки, при экспериментальном режиме постоянного трения 150 км отмечено полное истирание фрикционного металлокерамического элемента на основе графита фрикционного диска. Однако явления сваривания контактирующих металлических поверхностей при заданных условиях эксперимента не наблюдалось.

Построенные математические модели характеризуют достаточно положительную степень адекватности и качества в описании искомых функциональных зависимостях (3.2, 3.3). Что позволит эффективно прогнозировать изменения триботехнических параметров исследуемой системы в процессе эксплуатации ГМКП.

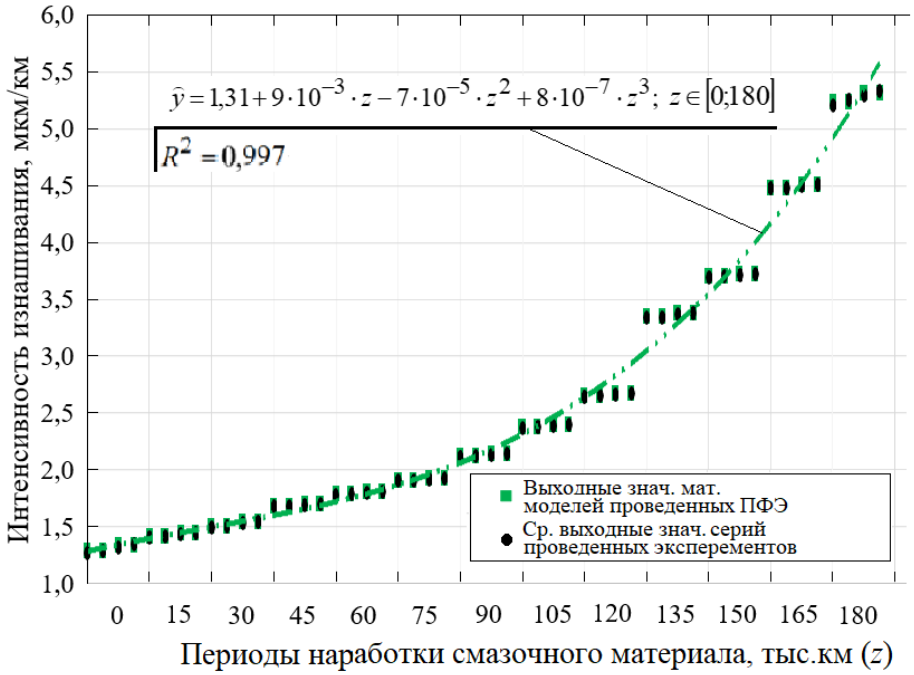


Рисунок 3.31 – Зависимость изменения интенсивности изнашивания от наработки СМ ГМКП

Установленные зависимости триботехнических параметров от наработки по характеру динамики согласуются с теорией изнашивания

В.Ф. Лоренца. По характеру полученной зависимости интенсивности изнашивания и её перегибам выделяются следующие периоды эксплуатации исследуемой триботехнической системы:

I период - приработки: не установлен (в проведенных исследованиях, так как данный период наиболее выражен на этапе обкатки или притирки агрегата на стенде в процессе его производства);

II период - нормального износа: 0 км – 105 000 км;

III период - интенсивного износа: 105 000 км – 180 000 км.

Полученным значениям интенсивности изнашивания соответствует такой вид контактного взаимодействия поверхностей трения, который характеризуется хрупким и вязким разрушением (микрорезанием) [111].

Для обоснования и выявления наиболее значимого триботехнического параметра, позволяющего с высокой достоверностью прогнозировать техническое состояние агрегата и идентифицировать момент перехода в зону аварийной эксплуатации, проведен также двухэтапный анализ (корреляционной и сенситивной оценки), рассмотренный ранее.

Корреляция коэффициента трения и интенсивности изнашивания от наработки СМ при эксплуатации ГМКП представлена в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Корреляция коэффициента трения и интенсивности изнашивания от наработки СМ в процессе эксплуатации ГМКП

Параметры	Дистанционная корреляция	Корреляция Спирмена	Корреляция Кендалла	Корреляция Пирсона		
	Наработка СМ, км				Интенсивность изнашивания, мкм/км	Коэффициента трения
	L	L	L	L	$I_И$	f_T
L	1,00	1,00	1,00	1,00		
$I_И$	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00	
f_T	0,99	0,99	0,99	0,94	0,95	1,00

По результатам корреляционной оценки, установлено, что коэффициент трения имеет сильную прямую корреляцию с интенсивностью изнашивания, что логично, а также установлено, что степень взаимосвязи у интенсивности

изнашивания с наработкой СМ значительнее (более 0,95), чем у коэффициента трения.

Результаты сенситивной характеристики [99, 100–102] показали, что интенсивности изнашивания имеет наибольшую чувствительность к наработке СМ.

График сенситивной оценки параметров триботехнической системы при наработки смазочного материала в процессе эксплуатации ГМКП представлен на рисунке 3.32.

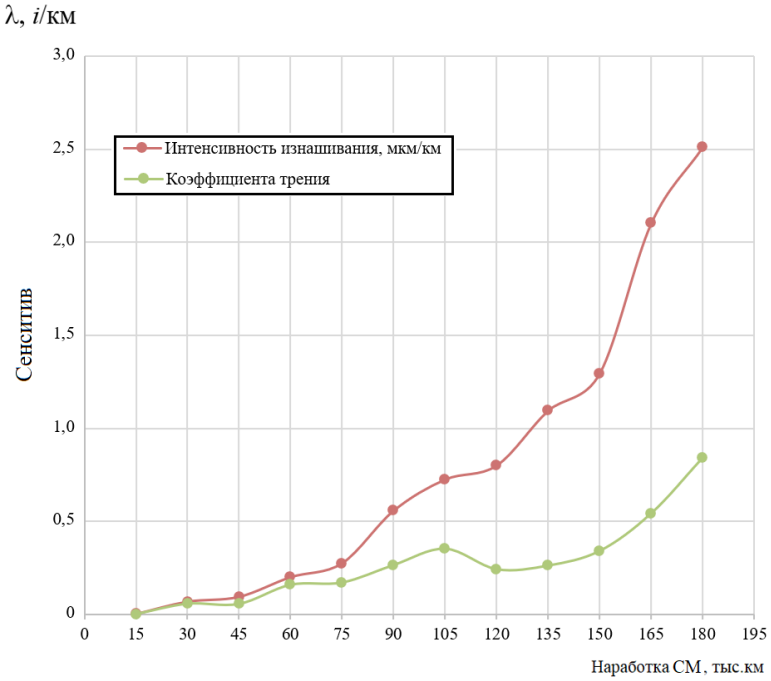


Рисунок 3.32 – График сенситивной оценки параметров триботехнической системы при наработки смазочного материала в процессе эксплуатации ГМКП

На основе проведённого сравнительного анализа триботехнических параметров для дальнейших исследований в качестве основного критерия был выбран параметр интенсивности изнашивания. Этот выбор обусловлен тем, что интенсивность изнашивания является наиболее чувствительным индикатором состояния наименее надёжного узла трения ГМКП, так как именно она в наибольшей степени коррелирует с наработкой СМ и агрегата.

Высокая степень корреляции данного параметра с наработкой СМ и его ФХ параметрами свидетельствует о выраженной прогностической способности. Это позволяет с высокой достоверностью прогнозировать техническое состояние агрегата и идентифицировать момент перехода в зону аварийной эксплуатации.

Таким образом, интенсивность изнашивания как триботехнический параметр является ключевым диагностическим показателем, имеющим высокую значимость для разработки метода обоснования периодичности ТО ГМКП.

Выводы по главе

1. Проведены подконтрольные испытания ГМКП ZF EcoLife 1 6AP1700B на трёх автобусах Volgabus 627102 CityRhythm 18 на типичном маршруте города Санкт-Петербург (с плотностью стратегических остановок 2 ост./км, а с учётом дополнительных вынужденных остановок (светофоры, пробки) этот показатель может достигать 3-4 ост./км). Средняя техническая скорость составила 14 км/ч, агрегат работал преимущественно на 1–2 передачах. В пиковые часы масса автобусов достигала и превышала допустимую (28 000 кг), что наряду с частыми разгонами и торможениями ускоряет износ фрикционных дисков и СМ. Влияние стиля вождения незначительно (доля комфортных разгонов – 96 %, торможений – 98 %).

2. Экспериментально установлены зависимости ФХ параметров работающего СМ от наработки при регламентированной периодичности ТО (180 000 км). Зафиксировано снижение кинематической вязкости на 44–48 %, индекса вязкости – на 35 единиц, температуры вспышки – на 18 %; кислотное число достигло 3,39 мг КОН/г. Концентрация железа превысила браковочную норму при наработке 60 000 км и к 180 000 км составила 234 ppm. Концентрация алюминия и меди превысила браковочную норму на интервале 90 000–105 000 км, содержание нерастворимых осадков – на 165 000 км.

Наиболее интенсивно по объему расходовались химически активные элементы присадок: фосфор (P) и сера (S) и кальций (Ca).

3. Экспериментально установлены зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания от наработки СМ (ПФЭ, машина трения 2070 СМТ-1, схема «ролик – колодка – смазочный материал»). Предельное - критическое значение коэффициента трения (0,009) достигнуто при 105 000 км (на 42 % раньше регламентированного срока). Интенсивность изнашивания резко возрастает после 105 000 км, а после 165 000 км зафиксировано полное истирание фрикционного материала. По характеру зависимости интенсивности изнашивания и её перегибам выделены периоды: нормального износа (0–105 000 км) и интенсивного износа (105 000–180 000 км), что согласуется с теорией В.Ф. Лоренца.

4. Обоснованы ключевые диагностические параметры через корреляционный и сенситивный анализ: кинематическая вязкость при 100 °C – как индикатор состояния СМ, концентрация химического элемента железа (Fe) – как индикатор износа пар трения, концентрация кальция (Ca) из рецептурного компонента присадок – как индикатор ухудшения моюще-диспергирующих свойств. Среди триботехнических параметров наибольшей прогностической способностью технического состояния агрегата обладает интенсивность изнашивания, наиболее тесно коррелирующая с наработкой и ФХ изменениями СМ.

5. Установлено, что регламентированная периодичность ТО (180 000 км) не обеспечивает эксплуатационной надёжности ГМКП в условиях мегаполиса. По характеру зависимости интенсивности изнашивания и её перегибам значимые изменения параметров происходят уже на интервале 60 000–105 000 км. Для обоснования периодичности ТО необходима разработка метода, учитывающего предельные значения диагностических параметров СМ до наступления аварийной зоны эксплуатации.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОРОБКАХ ПЕРЕДАЧ АВТОБУСОВ

4.1 Усовершенствование метода обоснования периодичности технического обслуживания агрегата

Задачей следующей части диссертационной работы являлась разработка метода обоснования периодичности ТО ГМКП на основе результатов ФХ и триботехнических исследований.

В классической теории технической эксплуатации автомобилей [8, с. 78] периодичность ТО по допустимому значению параметра технического состояния определяется путем анализа закономерности изменения этого параметра и его предельно значения. Данный подход предполагает выбор периодичности ТО на основе распределения параметра влияющего на техническое состояние объекта для совокупности изделий и заданного допустимого риска, что позволяет гарантировать безотказную работу с заданной вероятностью. Однако такой метод ориентирован на статистические данные, накопленные для парка однотипных изделий, и, как правило, устанавливает периодичность ТО по границам, соответствующим уже свершившимся отказам или их высокой вероятности.

В настоящей работе предлагается усовершенствование данного метода, которое заключается в переходе от статистического подхода к прогнозно-аналитическому на основе результатов проведенных ФХ и триботехнических исследований. Вместо определения предельных значений по вариационным (толерантным) границам распределения наработок на отказ предлагается устанавливать предельно допустимые значения значимого диагностического параметра СМ по началу устойчивого темпа его роста, а именно – по точке перехода триботехнической системы из периода нормального износа в период аварийного (интенсивного) износа. Именно

выявление этих значений и является инструментом реализации предлагаемого усовершенствования известного метода, позволяющим своевременно назначать периодичность ТО и упреждать переход агрегата в аварийную зону эксплуатации.

В отличие от известного метода, где предельные значения параметров устанавливаются на основе обработки уже произошедших отказов, предлагаемый подход позволяет не констатировать факт отказа, а прогнозировать его наступление и назначать профилактическое воздействие до того, как агрегат войдет в зону аварийного износа. Это обеспечивает возможность управления периодичностью ТО на основе фактического состояния смазочного материала, а не по усредненным статистическим нормативам.

В рамках данной задачи необходимо было установить и обосновать начало аварийной зоны наработки ГМКП, момент перехода из периода нормальной эксплуатации агрегата в аварийную стадию интенсивного износа, а именно определить момент достижения наработки СМ ГМКП, предшествующий устойчивому приросту значимого трибопараметра системы, для чего был проведен математический анализ его установленной зависимости (3.37). Методология анализа включала дискретный анализ, конечно-разностный анализ, оценку относительных темпов роста, дифференцирование и анализ устойчивого ускорения.

Поиск значимых точек изменения зависимости (3.37) проведен через дифференцированный анализ.

Скорость прироста (первая производная) изменения выходного параметра зависимости определена по формуле [112, 113, 114]:

$$\widehat{y}' = \frac{dy}{dx}, \tag{4.1}$$

где x – наработка СМ, км.

Показывает, как быстро прирастает выходное значение зависимости в процессе наработки СМ. Первая производная зависимости (3.37), (абсолютного прироста):

$$\hat{y}' = 2{,}4 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 1{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot x + 9{,}1 \cdot 10^{-3}.$$

Ускорение прироста (вторая производная) изменения выходного параметра зависимости определено по формуле [112, 113, 114]:

$$\hat{y}'' = \frac{d^2 y}{dx^2}. \tag{4.2}$$

Показывает, как меняется скорость прироста выходного значения зависимости процессе наработки СМ (разгонятся или замедлятся). Вторая производная зависимости (3.37):

$$\hat{y}'' = 4{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot x - 1{,}4 \cdot 10^{-4}.$$

Первая значимая точка наработки СМ – процесс изменения выходного параметра зависимости переходит от замедления роста к ускорению (момент, когда вторая производная становится положительной, то есть начало устойчивого положительного ускорения прироста параметра), $\hat{y}'' > 0$.

Расчетное значение первой значимой точки:

$$\hat{y}'' = 4{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot x - 1{,}4 \cdot 10^{-4} = 0$$

$$4{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot x - 1{,}4 \cdot 10^{-4} = 0$$

$$x = \frac{0{,}0000048}{0{,}00014} = 29{,}2$$

Математически по установленной зависимости (3.37) после наработки 29,2 тыс.км процесс изнашивания начинает ускоряться.

Дискретным анализом вычисляем выходные значения зависимости (3.37) для каждого этапа наработки СМ методом табулирования для получения дискретного ряда значений, для определения проявления влияния теоретически вычисленной значимой точки.

Относительный прирост выходных значений зависимости (3.37) для каждого интервала наработки СМ определен по формуле [113, 114, 115]:

$$ОП_y = \frac{y_{i+1} - y_i}{y_i} \cdot 100\% . \quad (4.3)$$

Показывает, относительное увеличение выходного значения зависимости (3.37) к предыдущему периода наработки состояния СМ.

Вторая значимая точка наработки СМ – относительный прирост выходного параметра зависимости (3.37) за период наработки становится значимым при условии $(ОП_y > 10\%)$. Как установлено в работах [98–100], превышение 10%-го предела относительного прироста интенсивности изнашивания свидетельствует о смене механизма изнашивания – переходе от стадии нормального износа к аварийному. Это характеризует начало деформации поверхностей трения и превышение скорости разрушения граничной смазочной пленки над скоростью её восстановления, что приводит к нестабильности трибосистемы.

Результаты расчетов математического анализа динамики изменения интенсивности изнашивания по установленной его зависимости представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты расчетов математического анализа динамики изменения интенсивности изнашивания по установленной зависимости

Наработка СМ	Выход. знач. зависимости интен. изнашивания	Скорость прироста за интервал наработки	Ускорение прироста за интервал наработки	Относительный прирост
L, тыс.км	I_u, мкм/км	I'_u, мкм/км	I''_u, мкм/км^2	$ОП_{(I_u)}$, %
0	1,311	-	-	-
15	1,434	0,123	-	9,42%
30	1,543	0,108	**-0,015**	7,54%
45	1,652	0,109	0,001	7,07%
60	1,778	0,126	0,017	7,64%
75	1,937	0,159	0,033	8,97%
90	2,146	0,209	0,050	**10,79%**
105	2,421	0,275	0,066	12,80%
120	2,777	0,357	0,082	14,73%
135	3,232	0,455	0,098	16,37%
150	3,801	0,569	0,114	17,60%
165	4,500	0,699	0,131	18,40%
180	5,347	0,846	0,147	18,80%

До интервала наработки СМ 30-45 тыс. км ускорение прироста отрицательно и достигло почти нуля (процесс замедлялся). Начиная с интервала наработки 45-60 тыс.км ускорение прироста становится устойчиво положительным, начинают изменятся параметры СМ. Относительный прирост не превышает 10%. Что характеризует данные интервалы как период нормальной работы ГМКП в процессе эксплуатации.

На интервале наработки 75-90 тыс.км относительный прирост превысил значение 10%, что характеризуется предпосылкой перед началом аварийной зоны износа ГМКП. Так как, уже после наработки 90 тыс.км относительный прирост стремительно и устойчиво увеличивается и ускоряется, что и свидетельствует о аварийной зоне наработки СМ для эксплуатации ГМКП.

Предлагаемый метод обоснования ТО ГМКП базируется на выявлении второй значимой точки зависимости интенсивности изнашивания от наработки СМ. Данная точка характеризует переход эксплуатации агрегата из периода нормального износа в аварийную стадию и служит основанием для обоснованного назначения рациональной замены СМ и фильтрующего элемента, обеспечивающей упреждение критического-повышенного износа в процессе эксплуатации агрегата.

Также, метод позволяет по установленной второй значимой точке определить предельно допустимые значения наиболее значимых диагностических параметров СМ. Для этого предлагается применять два подхода: графический подход и математический.

Математический подход заключается в подстановке выявленного значения начала аварийной зоны наработки, $L_{ав}$, км, в математическую аналитическую зависимость значимого диагностического параметра СМ, полученную по результатам ФХ исследований.

Предельно допустимое значение диагностического параметра СМ, $П_{СМ}^{пред}(L_{ав})$, функционально зависящего от наработки соответствующей аппроксимацией (полиномиальной, степенной, экспоненциальной и др.),

определенная по экспериментальным данным. Общий вид формулы для полиномиальной зависимости:

$$П_{СМ}^{пред} = П_{СМ}^{пред}(L_{ав}) = f(L_{ав}) = b_0 + b_1 \cdot L_{ав} + b_2 \cdot {L_{ав}}^2 + ... + b_i \cdot {L_{ав}}^i, \quad (4.4)$$

где $П_{СМ}^{пред}$ – предельно допустимого значения диагностического параметра СМ;

$L_{ав}$ – наработка СМ перехода в аварийную стадию эксплуатации, км;

$f(L_{ав})$ – функция аппроксимации, установленная по экспериментальным данным.

Пример 1. Зависимость кинематической вязкость при 100°С:

$$v^{100°C} = -1 \cdot 10^{-15} \cdot L^3 + 1 \cdot 10^{-10} \cdot L^2 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot L + 10{,}16$$

$$v^{100°C} = -1 \cdot 10^{-15} \cdot (90000)^3 + 1 \cdot 10^{-10} \cdot (90000)^2 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot (90000) + 10{,}16$$

$$v^{100°C} = 9{,}5 \text{ мм}^2/\text{с}.$$

Пример 2. Концентрация химического элемента (износа) - Железа (Fe):

$$C_{(Fe)} = 8 \cdot 10^{-14} \cdot L^3 - 2 \cdot 10^{-8} \cdot L^2 + 0{,}002 \cdot L$$

$$C_{(Fe)} = 8 \cdot 10^{-14} \cdot (90000)^3 - 2 \cdot 10^{-8} \cdot (90000)^2 + 0{,}002 \cdot (90000)$$

$$C_{(Fe)} = 85 \text{ мг/кг}.$$

Графический подход заключается в наложении на единую координатную плоскость графиков относительного прироста интенсивности изнашивания и зависимости диагностического параметра СМ от наработки. Абсцисса точки пересечения уровня относительного прироста $(ОП_{(I_u)} = 10\%)$ с кривой изменения параметра СМ определяет его предельно допустимое значение.

Графический подход определения предельно допустимого значения диагностических параметров СМ представлен на рисунке 4.1.

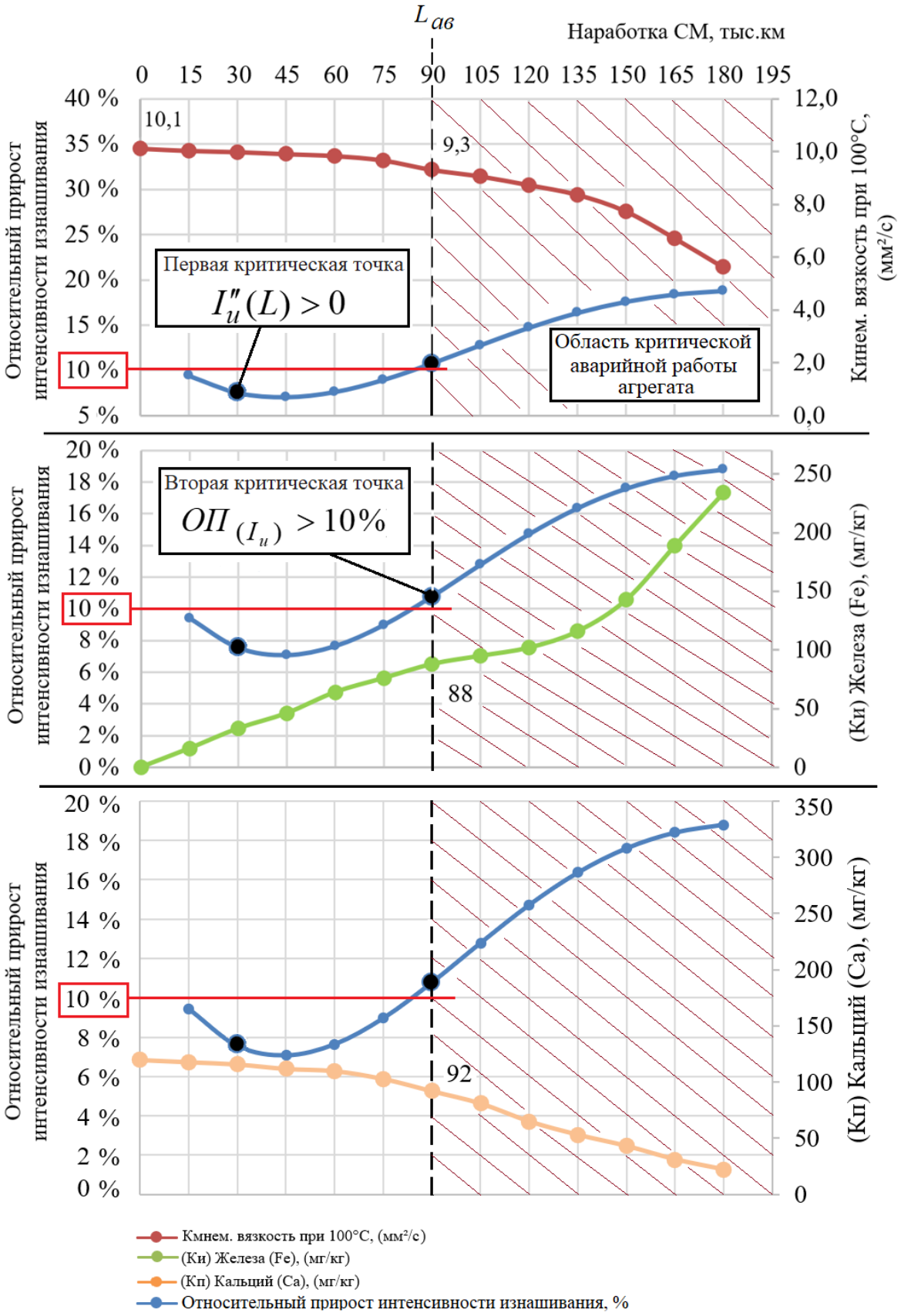


Рисунок 4.1 – Графический подход определения предельно допустимого значения диагностических параметров СМ

По результатам анализа наложения графиков выявлены следующие предельно допустимые значения ключевых диагностических параметров СМ, в периоде начала зоны аварийной эксплуатации (наработки):

Кинем. вяз. при 100°С – от 9,3 до 9,5 мм^2/с.

Концентрация Железа (Fe) – от 85 до 88 мг/кг;

Концентрация Кальция (Ca) – от 87 до 92 мг/кг.

Следовательно, при достижении данных значений параметров СМ, требуется проведение ТО ГМКП (замена СМ и фильтрующего элемента), для упреждения аварийной эксплуатации ГМКП.

Таким образом, в результате применения усовершенствованного метода обоснования периодичности ТО ГМКП, разработанного на базе современного поколения агрегатов ZF EcoLife 1 6AP1700B и СМ Shell Spirax S6 ATF новейших рецептур, установлено, что рациональная замена СМ и фильтрующего элемента необходима при наработке 90 000 км.

Предлагаемый подход предполагает проведение отбора проб СМ с интервалом, кратным регламентируемой периодичности ТО (например, 5 000, 10 000 или 15 000 км). При этом чем чаще выполняется отбор, тем выше достоверность получаемых зависимостей, однако для обеспечения интеграции метода в существующую систему ТО целесообразно соблюдать кратность отбора в соответствии с положениями теории технической эксплуатации АТС. В ходе подконтрольных испытаний отбор проб СМ проводился через каждые 15 000 км (кратно ТО-1), поэтому обоснованная рациональная периодичность ТО 90 000 км (кратно ТО-2) при внедрении в практическую деятельность не требует изменения существующих регламентов.

Метод статистически и математически обоснован применительно к рассматриваемой модели ГМКП и условиям её эксплуатации. При этом для других моделей ГМКП или иных условий эксплуатации (например, междугородных или пригородных перевозок) предусмотрен единый методический подход: достаточно провести однократные базовые

исследования для усовершенствованного метода, результаты которого определят рациональную периодичность ТО рассматриваемого агрегата.

В основе усовершенствованного метода лежат следующие ключевые принципы:

Анализ динамики параметра. Используются первая и вторая производные параметра интенсивности изнашивания триботехнической системы (скорость и ускорение роста), а также его относительный прирост за интервал наработки.

Критерий перехода. Точкой назначения периодичности ТО является не момент достижения параметром интенсивности изнашивания предельного значения, а момент, когда относительный прирост параметра за интервал наработки начинает устойчиво превышать порог 10%, характеризующий переход триботехнической системы в нестабильное состояние, что свидетельствует о смене механизма изнашивания и начале аварийного периода эксплуатации агрегата.

Прогнозная направленность. Метод позволяет не констатировать факт отказа агрегата, а прогнозировать его наступление и назначать профилактическое воздействие (замену СМ и фильтров) до того, как агрегат войдет в зону аварийного износа.

Для обоснования технического эффекта усовершенствованного метода в следующем подразделе проведены исследования ресурса ГМКП в зависимости от изменения параметров триботехнической системы.

4.2 Оценка ресурса агрегата при применении усовершенствованного метода

Одной из причин гидромеханического характера, приводящих к снижению долговечности и необходимости ТО в агрегатах гидромеханических трансмиссии автобусов, как упоминалось ранее, являются различные аккумулирующие процессы, способные вызывать нарушения в

функционировании и даже приводить к поломкам отдельных узлов и деталей механических и гидравлических частей агрегата.

В работе предпринята попытка прогнозирования ресурса ГМКП на основе установленных триботехнических зависимостей наиболее подверженного износу узла трения при эксплуатации агрегата, а именно выявленного в процессе проведенных исследований узла трения – фрикционной муфты сцепления.

В рамках поставленной задачи исследований требовалось определить характер влияния разработанного метода обоснования периодичности ТО на ресурс ГМКП для обеспечения возможности его прогнозирования в процессе эксплуатации с учетом рационально выявленной периодичности ТО.

Ресурс ГМКП ограничен износом фрикционных дисков (ведущих и ведомых) муфты сцепления, которые, в свою очередь, лимитируются толщиной металлокерамического фрикционного слоя. Наиболее интенсивно фрикционный материал изнашивается в процессе работы трибоузла (сжатие – включение муфты).

Износ слоя, H_u, фрикционного материала дисков муфты сцепления может быть выражен по формуле:

$$H_u = H_0 - H_{пред.} \tag{4.5}$$

где H_0 – номинальная толщина слоя фрикционного материала, составляет;

$H_{пред.}$ – предельный допустимая толщина слоя фрикционного материала, составляет.

Следовательно, техническое состояние фрикционных дисков определяет долговечность агрегата, что подтверждается как результатами собственных исследований, так и апробированными результатами других авторов.

Циклограмма работы фрикционной муфты сцепления ГМКП представлен на рисунке 4.2.

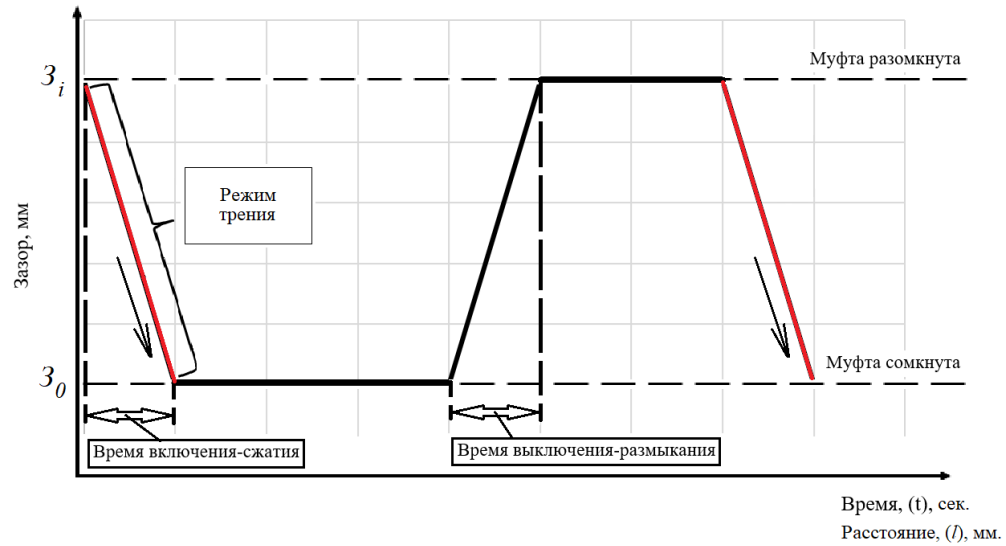


Рисунок 4.2 – Циклограмма работы фрикционной муфты сцепления ГМКП

Как упоминалось, износ муфты сцепления происходит в момент времени включения-сжатия, при котором и происходит процесс трения материалов. В момент времени выключения-размыкания муфты трения материалов отсутствует, следовательно отсутствует и износ дисков сцепления [1, 14, 35, 67, 70].

Для разработки модели прогнозирования ресурса ГМКП – износа муфты сцепления, полученные результаты исследований триботехнического параметра - интенсивности изнашивания были рассмотрены по отношению ко времени трения исследуемого сопряжения в процессе наработки ГМКП и СМ. Так как, параметр интенсивности изнашивания зависит от суммарного накопленного времени трения или длины пути трения при сжатии фрикционных дисков муфты, а также от изменений параметров СМ.

Время трения фрикционных дисков муфты сцепления ГМКП определяется по формуле [43, 44, 110]:

$$t_m = L_м \cdot N_{вкл.} \cdot t_{вкл.} \qquad (4.6)$$

где $L_м$ – наработка ГМКП или муфты сцепления в процессе эксплуатации автобуса, км;

$N_{вкл.}$ –количество включений муфты за 1 км наработки, раз/км;

$t_{вкл.}$ – время включения-сжатия муфты сцепления, с.

Путь трения фрикционных дисков муфты сцепления ГМКП определяется по формуле [43, 44, 110]:

$$L_m = t_m \cdot n_{об.} \cdot d_{ср.} \cdot \pi\,, \tag{4.7}$$

где $n_{об.}$ – частота вращения муфты сцепления, об/мин;

$d_{ср.}$ – средний диаметр фрикционного диска, мм.

Построенная математическая модель износа слоя фрикционного материала дисков муфты сцепления функционально от пути процесса трения данных элементов исследуемой системы трения агрегата $H_u = f(L_{m\,(м)})$, и может быть использована для нахождения предельного значения наработки $L_м^{пред}$:

$$\left(N_{вкл.} \cdot t_{вкл.} \cdot n_{об.} \cdot d_{ср.} \cdot \pi\right) \cdot \int_0^{L_м^{пред}} I_u(L_м) \cdot dL_м = H_0 - H_{пред.}, \tag{4.8}$$

где $L_м^{пред}$ – наработка муфты сцепления ГМКП до предельного износа фрикционного слоя дисков сцепления (ресурс), км.

Полученная математическая модель описывает прогнозирование износа слоя фрикционного материала дисков муфты сцепления ГМКП и служит основой для расчета ресурса агрегата. Поскольку интенсивность изнашивания, I_u, не является постоянной линейной величиной, а возрастает по мере накопления пути трения и изменения параметров СМ внутри одного периода наработки, поэтому форма прогнозирования износа и ресурса имеет интегральный вид. Под ресурсом в данном случае понимается наработка ГМКП до момента полного отказа, когда износ фрикционного слоя достигает предельного – нулевого значения и агрегат направляется на капитальный ремонт.

Для прогнозирования ресурса необходимо выразить износ как функцию наработки ГМКП с учётом периодичности ТО, в ходе которого происходит

обновление параметров СМ. Требуется определить значение наработки ГМКП, при котором в условиях безотказной эксплуатации износ фрикционного материала дисков сцепления достигнет предельного значения.

Выражение предельной наработки (ресурса), $L_{м}^{пред}$, из математической модели в явном аналитическом виде проблематично: интегрирование установленной зависимости интенсивности изнашивания приводит к уравнению четвертой степени, а циклическое обновление триботехнических и ФХ параметров СМ с учетом периодичности ТО вносит дополнительную сложность.

В связи с этим прогнозирование ресурса муфты сцепления реализовано расчетным способом – разработана модель, которая с помощью численных методов связывает остаточную толщину фрикционного материала с наработкой СМ через параметр триботехнической системы и последовательно рассчитывает накопление износа. Модель связывает остаточную толщину фрикционного материала с наработкой СМ через параметр триботехнической системы [116, 117, 118].

Алгоритм численного моделирования прогнозирования ресурса ГМКП представлен на рисунке 4.3.

Разработанная численная модель реализует последовательный расчёт накопления износа с учётом периодичности ТО, что позволяет определить наработку ГМКП до ремонта.

Численная модель позволяет:

1. Оценить динамику накопления износа фрикционного слоя в процессе наработки муфты сцепления ГМКП.

2. Учитывать влияние периодичности ТО, при которой происходит обновление триботехнического параметра и ФХ параметров СМ.

3. Определить ресурс муфты сцепления путём приравнивания текущего износа к предельному значению (нулевому значению толщины фрикционного слоя).

На базе разработанного алгоритма численного моделирования прогнозирования ресурса ГМКП разработан программный кодовый модуль, применимый для внедрения в программное обеспечение. Модуль позволяет осуществить переход от теоретических расчетов к прикладному инструменту, обеспечивающему оперативное получение результатов по исходным данным.

Программный кодовый модуль численного прогнозирования ресурса ГМКП по критерию износа фрикционного слоя дисков муфты сцепления с учетом периодичности ТО представлен в приложении Ш.

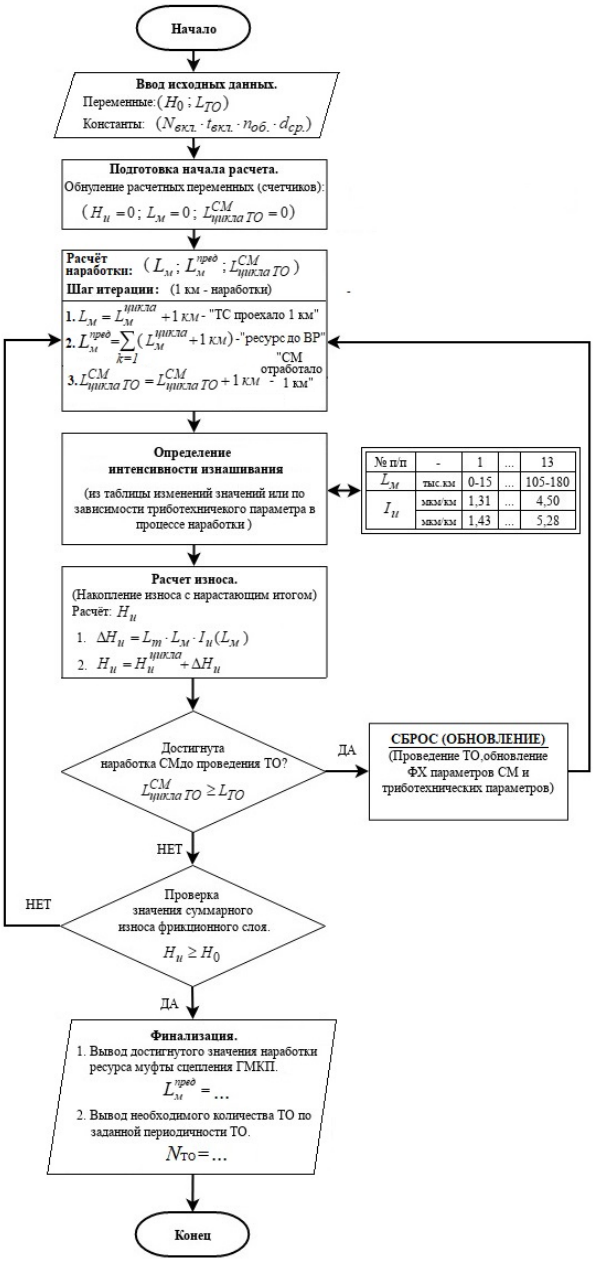


Рисунок 4.3 – Алгоритм численного моделирования прогнозирования ресурса ГМКП

Результаты расчетов численной модели прогнозирования ресурса ГМКП при стандартной периодичности ТО и предлагаемой рациональной по разработанному методу представлены в приложении Э.

График прогнозирования ресурса ГМКП автобуса при эксплуатации представлен на рисунке 4.4.

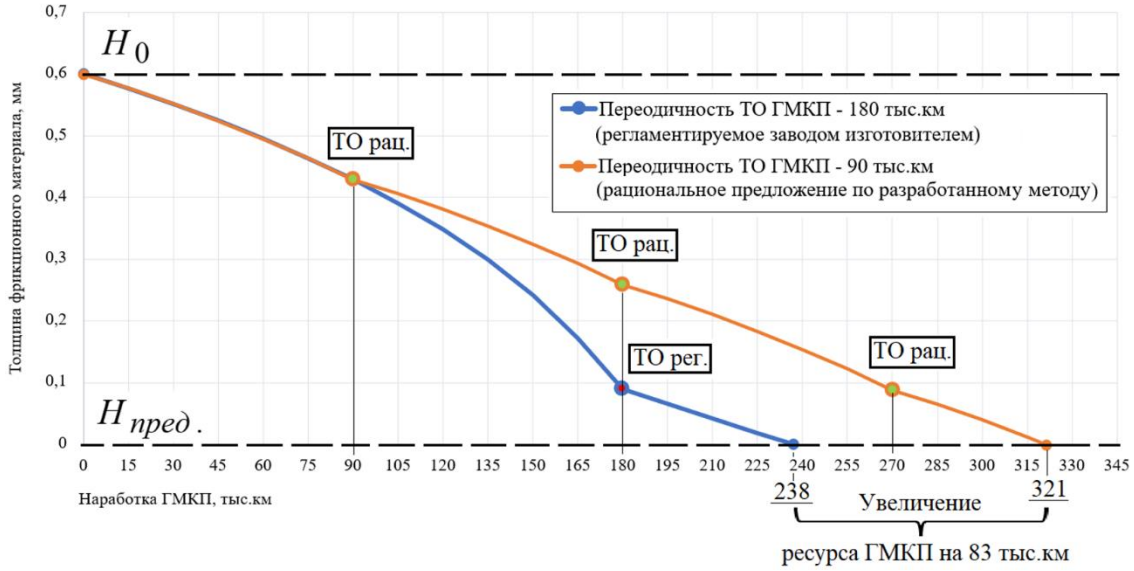


Рисунок 4.4 – График прогнозирования ресурса ГМКП автобуса при эксплуатации

Разработанная численная модель прогнозирования ресурса исследуемых ГМКП показала следующие результаты:

При стандартной регламентируемой периодичности ТО (180 000 км):

– ресурс ГМКП до ремонта составляет 238 000 км;

– общий путь трения дисков – 268 км;

– общее количество включений – 948 тыс. раз;

– количество ТО – 1 раз.

При применении усовершенствованного метода с обоснованной рациональной периодичностью ТО (90 000 км):

– ресурс ГМКП до ремонта составляет 321 000 км;

– прирост ресурса – 83 545 км (+35 %);

– общий путь трения дисков – 363 км;

– общее количество включений – 1 285 тыс. раз;

– количество ТО – 3 раз.

Для подтверждения обоснованности рациональной периодичности ТО и оценки её значимости выполнен сравнительный расчёт прогнозируемого ресурса ГМКП по разработанной численной модели.

Сравнительная оценка прогнозируемого ресурса ГМКП при изменении периодичности ТО представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Сравнительная оценка прогнозируемого ресурса ГМКП при изменении периодичности ТО

Периодичность ТО, км	Износ фрикц. слоя за наработку до первого ТО, мм	Количество ТО до ВР, шт.	Ресурс ГМКП до ВР, км	Прирост ресурса ГМКП, км
180 000	0,5104	1	237 800	–
90 000	0,1707	3	321 345	+83 545
80 000	0,1478	4	325 670	+4 325
70 000	0,1253	4	328 120	+2 450
60 000	0,1049	5	331 400	+3 280
50 000	0,0844	7	334 250	+2 850

Сравнительная оценка прогнозируемого ресурса ГМКП при изменении периодичности ТО показала, что переход с регламентируемой периодичности 180 000 км на 90 000 км, определённую по усовершенствованному методу, обеспечивает максимальный прирост ресурса агрегата. Увеличение ресурса составляет 83 545 км, или 35 %, что эквивалентно примерно одному году дополнительной эксплуатации.

Дальнейшее сокращение периодичности ТО (до 80 000, 70 000, 60 000 км и менее) приводит к незначительному приросту ресурса – не более 3 % (около 10 000 км) – при существенном росте эксплуатационных затрат.

Таким образом, построенные модели позволяют количественно и качественно оценить повышение долговечности ГМКП при применении обоснованной периодичности ТО и подтверждают их техническую

значимость для разрабатываемого метода повышения долговечности агрегата при эксплуатации.

На основании полученных результатов предлагается при ТО по усовершенствованному методу, особенно при приближении к прогнозируемому ресурсу агрегата, выполнять комплексные диагностические мероприятия, направленные на выявление ранних признаков неисправностей (рывки, вибрации, локальные перегревы). В случае обнаружения указанных симптомов после третьего ТО рекомендуется проводить предупредительный ремонт ГМКП, уделяя особое внимание агрегатам в период наработки 300 000 – 315 000 км при проведении очередного ТО.

Работы по техническому обслуживанию ГМКП предлагается включить в перечень операций расширенного технического обслуживания «ТО-2» в соответствии с руководством по эксплуатации автобусов.

Для практической реализации усовершенствованного метода и результатов исследования разработан метод повышения долговечности агрегата путём совершенствования системы ТО.

4.3 Метод повышения долговечности и направления его применения

На основе полученных в ходе исследований научных положений разработан метод повышения долговечности ГМКП, реализующийся через последовательность действий. Метод предназначен для корректирования нормативов ТО АТП, эксплуатирующих городские автобусы для регулярных перевозок пассажиров, а также для обоснования этих нормативов производителями АТС и агрегатов с учётом конкретных условий эксплуатации.

Метод включает четыре этапа [116, 117, 118, 119]:

I этап – сбор нормативных и исходных данных (руководство по эксплуатации ГМКП, спецификации СМ, условия эксплуатации, регламентированная периодичность ТО);

II этап – анализ состояния и подбор СМ (лабораторные исследования ФХ параметров, химического элементного состава и интенсивности изнашивания);

III этап – определение периодичности ТО и прогнозирование ресурса (мониторинг диагностических параметров СМ, выявление момента перехода эксплуатации в аварийную стадию с повышенным износом триботехнической системы, расчёт ресурса по численной модели);

IV этап – назначение рациональной периодичности ТО на основе полученных данных.

Реализация метода не требует дополнительного сложного оборудования или существенных временных затрат. Метод построен на использовании доступных для АТП исходных данных: нормативно-справочной информации, результатов анализа ФХ состояния СМ, а также данных эксплуатационного учёта. Это обеспечивает возможность его внедрения в рамках существующих систем ТО совершенствуя их без кардинальной перестройки производственных процессов АТП.

Метода повышения долговечности ГМКП автобусов при эксплуатации представлен на рисунке 4.5.

Таким образом разработанный метода предназначены для:

– определения прогнозируемого ресурса ГМКП при применении рекомендованных или выбранных СМ для эксплуатации;

– назначения рациональной периодичности ТО на первых этапах или до начала эксплуатации ГМКП;

– корректирования периодичности ТО при эксплуатации ГМКП;

– подбора аналогов рекомендуемых СМ;

– упреждение снижения ресурса ГМКП вследствие некорректного назначения периодичности ТО.

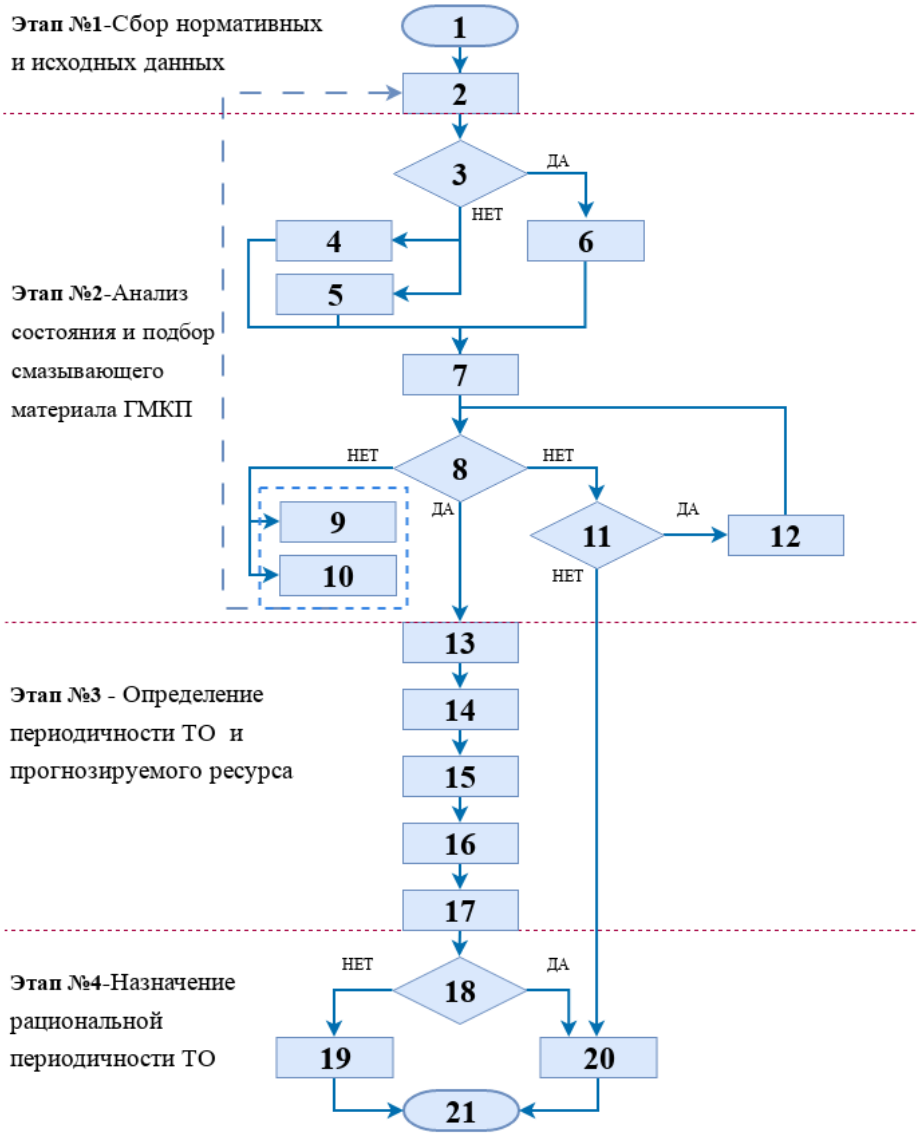


Рисунок 4.5 – Метод повышения долговечности ГМКП автобусов при эксплуатации

Описание алгоритма:

1. **Начало.**
2. **Сбор** нормативных и исходных данных (документация: руководство по эксплуатации ГМКП; спецификация допустимых к применению СМ для эксплуатации ГМКП; марка и модель ГМКП автобуса; условия эксплуатации автобуса; нормативные значения параметров СМ от

производителя ГМКП; регламентируемая периодичность ТО от производителя ГМКП).

3. **Проверка** стадии использования СМ (вниз-НЕТ "закупка, поставка, хранение" / вправо-ДА "применение, эксплуатация в агрегате").
4. **Сбор** информации о параметрах СМ, характеризующих его состояние и свойства от производителя или поставщика.
5. **Определение** параметров СМ в условиях специализированной лаборатории при отсутствии открытой и доступной информации, а также при организации входного контроля качества горюче-смазочных материалов.
6. **Определение** параметров состояния и свойств СМ, работающего в стадии эксплуатации агрегата.
7. **Выбор** типа перечня проверки параметров СМ, для лабораторных исследований.

   ТИП 1. Анализ параметров состояния СМ – менее затратная процедура, включающая оценку таких параметров как кинематической вязкости, индекс вязкости, кислотное число, плотность, температура вспышки и замерзания и д.р. И анализ триботехнического параметра (интенсивности изнашивания).

   ТИП 2. Анализ параметров состава СМ – более дорогостоящая процедура, позволяющая определить концентрацию накапливаемых в процессе наработки химических элементов износа и загрязнения, а также состава снижаемых в процессе наработки рецептурных присадок. И анализ триботехнического параметра (интенсивности изнашивания).

   Выбор типа исследования зависит от финансовых возможностей предприятия. Рекомендуется сочетать оба подхода, регулярный анализ параметров состояния СМ для общего контроля и эпизодические исследования состава СМ для детального изучения критичных образцов СМ.

8. **Проверка** соответствия значений контрольных параметров СМ нормативным требованиям ГМКП и СМ (влево-НЕТ «условие – для работающего СМ» и вправо-НЕТ «действие – для подбираемого СМ или планируемых к заправке» /вниз-ДА).
9. **Проведение** повторного подбора СМ в соответствии с документацией ГМКП и СМ.
10. **Проведение** замены партии(-й) СМ в случае стадии поставки или хранения.
11. **Проверка** соответствия для работающего СМ в агрегате, достижения предельно допустимых значений диагностических параметров СМ до значений начала аварийного уровня. (вправо-ДА/вниз-НЕТ).
12. **Проведение** ТО по замене СМ и фильтрующего элемента на СМ с учетом выполнения требований блока №8 (ДА).
13. **Проведение** мониторинга значимых диагностических параметров СМ (кинематической вязкости при 100 °С, концентрации элемента износа – Железа (Fe) и триботехничесгого параметра (интенсивность изнашивания) в процессе эксплуатации (транспортной работы) агрегата с продолжительностью 1-ого сервисного цикла ТО.
14. **Определение** по усовершенствованному методу обоснования периодичности ТО (наработки – начала зоны аварийного износа) агрегата.
15. **Определение** по установленной зоне аварийного износа агрегата предельно допустимых значений диагностических параметров СМ, по которым в дальнейшей эксплуатации и проводится мониторинг и контроль его технического состояния.
16. **Прогнозирование** ресурса ГМКП по разработанной численной модели.
17. **Построение** графика прогнозируемого ресурса.
18. **Проверка** значимости полученного прогнозируемого ресурса (влево-НЕТ/вправо-ДА).
19. **Продолжение** эксплуатации работающего СМ в агрегате с применением регламентируемой периодичностью ТО от производителя.

20. **Назначение** рациональной периодичности ТО агрегата.

21. **Конец.**

Таким образом, разработанный метод позволяет без вмешательства в конструкцию агрегата обоснованно корректировать периодичность ТО, упреждая аварийную эксплуатацию. Направления реализации: АТП – корректирование нормативов ТО; производители АТС и агрегатов – обоснование под конкретные условия эксплуатации.

4.4 Подконтрольные эксплуатационные испытания агрегата при применении разработанного метода

Подконтрольные эксплуатационные испытания ГМКП были организованы на базе ГУП ПАТ. В рамках испытаний в подконтрольной эксплуатации находятся три городских автобуса ОБК марок «Volgabus 627102 CityRhythm 18».

В соответствии с усовершенствованным методом, на третьем регламентируемом «ТО-2» по рекомендациям завода-изготовителя автобуса и при первом рациональном ТО по методу были выполнены работы по замене СМ и фильтрующего элемента ГМКП.

За период подконтрольной эксплуатации после внедрения метода повышения долговечности средняя наработка автобусов при выполнении транспортной работы составила 171 749 км. В ходе проведения «ТО-1» (165000 км) признаков, свидетельствующих о нарушении работоспособности или повышенном износе агрегатов, не наблюдается.

4.5 Технико-экономическая эффективность внедрения метода

Эффективность от применения разработанного метода повышения долговечности ГМКП при эксплуатации на примере СПб ГУП «Пассажиравтотранс» оценена расчётами по стандартным

методикам определения экономического эффекта на АТП и в промышленности с использованием принципов бухгалтерского учёта, финансового менеджмента, инвестиционного анализа и сравнительной оценки вариантов решений. Такой подход позволяет технико-экономически обосновать целесообразность выбора технических и технологических мероприятий по развитию технической стратегии предприятия, обеспечивая повышение рентабельности активов и снижение текущих издержек.

Исходные данные для расчета технико-экономической эффективности метода представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Исходные данные для расчета технико-экономической эффективности метода

Показатель	Обозначение	До	После
Периодичность ТО	$L_{ТО}$	180 000 км	90 000 км
Объём заменяемого СМ	$V_{СМ}$	48 л	48 л
Средняя стоимость за 1 литр СМ	$C_{СМ}$	1600 руб.	1600 руб.
Средняя стоимость фильтра СМ	$C_{ФСМ}$	4000 руб.	4000 руб.
Прогнозируемый ресурс ГМКП до ВР	$T_{прогн.}$	238 000 км	321 000 км
Средняя наработка автобуса до списания в утилизацию (за 10 лет)	$L_{ср.\,ССА}$	750 000 км	750 000 км
Средний суточный пробег автобуса	$L_{ср.\,сут.}$	170 км	170 км
Доход за 1 км транспортной работы	$Д_{1км\ ТР}$	240 руб.	240 руб.
Продолжительность простоя АТС на капитальном ремонте	$t_{Р}$	60 дней	60 дней
Продолжительность простоя на ТО	$t_{ТО}$	1 день	1 день
Средняя стоимость одного капитального ремонта агрегата	$C_1^{Р}$	1 350 000 руб.	1 350 000 руб.
Аварийный выезд технической помощи	$C_{АВТП}$	4 000 руб.	4 000 руб.
Штрафные санкции за невыполнение транспортной работы	$C_{ШС}$	3 500 руб.	3 500 руб.
Затраты на лабораторные исследования состояния СМ:			
1. Анализ микропараметров СМ каждые 15 000 км	$C_{ЛИ1}$	6 500 руб.	6 500 руб.
2. Анализ макропараметров СМ каждые 30 000 км	$C_{ЛИ2}$	10 500 руб.	10 500 руб.
Запасы запасных частей на одну ГМКП на 1 год	$З_{ЗЧ}$	100 000 руб.	50 000 руб

Количество ТО агрегата за весь срок эксплуатации автобуса определено по формуле [8]:

$$N_{TO} = \frac{L_{ср.\,ССА}}{L_{TO}}. \quad (4.9)$$

Общие затраты на ТО агрегата за весь срок эксплуатации автобуса определены по формуле [120, 121]:

$$З_{TO} = N_{TO} \cdot (V_{CM} \cdot C_{CM} + C_{ФСМ}). \quad (4.10)$$

Количество капитальных ремонтов агрегата за срок эксплуатации автобуса определено по формуле [8]:

$$N_P = \frac{L_{ср.\,ССА}}{T_{прогн.}}. \quad (4.11)$$

Общие затраты на капитальные ремонты агрегата за срок эксплуатации автобуса определены по формуле [120, 121]:

$$З_P = N_P \cdot C_1^P. \quad (4.12)$$

Общие прямые затраты на ТО и ВР ГМКП за весь срок эксплуатации автобуса определены по формуле [120, 121]:

$$\sum ПЗ = З_{TO} + З_P. \quad (4.13)$$

В процессе эксплуатации ГМКП возникают помимо прямых затрат расходы, связанные с косвенными (скрытыми) убытками, возникающими в результате плановых ТО и Р, а также не прогнозируемых полных или частичных отказов при выполнении транспортной работы.

Дни простоя автобуса на ТО и Р агрегата за срок эксплуатации определены по формуле [120, 121]:

$$T_{TO\,и\,P} = (N_{TO} \cdot t_{TO}) + (N_P \cdot t_P). \quad (4.14)$$

Недополученная прибыль из-за простоев на ТО и Р агрегата срок эксплуатации автобуса определены по формуле [120, 121]:

$$У_П = (L_{ср.\,сут.} \cdot Д_{1км\,ТР}) \cdot T_{TO\,и\,P}. \quad (4.15)$$

Штрафы за невыполнение обязательств по выполнению транспортной работы в виду срывов рейсов по причине полных отказов ГМКП за срок эксплуатации автобуса определены по формуле [120, 121]:

$$У_{Ш} = N_{Р} \cdot С_{ШС}. \quad (4.16)$$

Ежегодные затраты на резервные части на одну ГМКП за срок эксплуатации (10 лет) автобуса определены по формуле [120, 121]:

$$У_{ЗЧ} = 10 \cdot З_{ЗЧ}. \quad (4.17)$$

Общие косвенные (скрытые) затраты на ТО и Р агрегата за срок эксплуатации автобуса определены по формуле [120, 121]:

$$\sum КЗ = У_{П} + У_{Ш} + У_{ЗЧ}. \quad (4.18)$$

Общие затраты на эксплуатацию агрегата за срок эксплуатации автобуса определены по формуле [120, 121]:

$$\sum ОЗ = \sum ПЗ + \sum КЗ. \quad (4.19)$$

Применение разработанного метода предполагает переход к научно обоснованному управлению техническим состоянием подвижного состава на основе регулярного мониторинга ключевых параметров СМ в процессе эксплуатации ГМКП, что позволяет своевременно назначать периодичность ТО и повышать долговечность агрегата при минимизации эксплуатационных затрат.

Затраты на мониторинг состояния ПРСМ ГМКП за срок эксплуатации автобуса определены по формуле:

$$З_{МС}^{ПРСМ} = (\frac{L_{ср.ССА}}{L_{ЛИ1}} \cdot С_{ЛИ1}) + (\frac{L_{ср.ССА}}{L_{ЛИ2}} \cdot С_{ЛИ2}). \quad (4.20)$$

Экономический эффект от применения разработанного метода за срок эксплуатации ГМКП автобуса определен по формуле [120, 121]:

$$\Delta Э_{О} = \sum ОЗ_{ДО} - (\sum ОЗ_{ПОСЛЕ} + З_{МС}^{ПРСМ}). \quad (4.21)$$

Итоговый эффект от внедрения разработанного метода, объединяющий технический (повышение долговечности) и экономический (снижение затрат)

результат, оценён с помощью показателей: себестоимости км эксплуатации агрегата и эффективности затрат на км его эксплуатацию.

Себестоимость км эксплуатации агрегата определена по формуле [120, 121]:

$$C_{экспл.} = \frac{\sum ОЗ}{T_{прогн.}}. \quad (4.22)$$

Эффективность затрат на км эксплуатации агрегата (сколько километров наработки обеспечивает один рубль затрат) определена по формуле [120, 121]:

$$Э_{ОЗ} = \frac{T_{прогн.}}{\sum ОЗ}. \quad (4.23)$$

Результаты расчетов ожидаемого технико-экономического эффекта применения разработанного метода на одну единицу подвижного состава АТП представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчетов ожидаемого технико-экономического эффекта применения разработанного метода на одну единицу подвижного состава АТП

Показатель	Обозначение	До	После
Интервал ТО	$L_{ТО}$	180 000 км	90 000 км
Технический эффект:			
- прогнозируемый ресурс до ремонта	$T_{прогн.}$	238 000 км	**321 000** км
- количество ТО ГМКП	$N_{ТО}$	3	**7**
- количество ремонтов ГМКП	$N_{Р}$	3	**2**
Годовые запасы запчастей (прогнозное на 10 лет)	$У_{ЗЧ}$	1 200 000 руб.	**600 000** руб.
Общие затраты на ТО ГМКП	$З_{ТО}$	242 400 руб.	565 600 руб.
Затраты на мониторинг состояния ПРСМ	$З_{МС}^{ПРСМ}$	-	587 500 руб.
Общие прямые затраты	$\sum ПЗ$	4 292 400 руб.	3 265 600 руб.
Общие косвенные (скрытые) затраты	$\sum КЗ$	8 554 500 руб.	5 503 000 руб.
Всего затрат	$\sum ОЗ$	12 846 900 руб.	9 356 100 руб.
Общий ожидаемый экономический эффект (за 10 лет)	$\Delta Э_{О}$	-	**3 495 800** руб.

Показатель	Обозначение	До	После
Годовой экономический эффект	$\Delta Э_Г$	-	**291 317** руб.
Итоговое технико-экономическое обоснование			
Себестоимость км эксплуатации	$C_{экспл.}$	17,13 руб./км	**12,47** руб./км
Эффективность затрат на км эксплуатации	$Э_{ОЗ}$	0,058 км/руб.	**0,080** км/руб.

Благодаря применению нового метода повышения долговечности ГМКП и сопутствующему сокращению количества их капитальных ремонтов и уменьшению объема запасов запасных частей общий уровень издержек предприятия существенно снижается.

Предложенный метод обеспечивает ожидаемый экономический эффект по снижению общих издержек предприятия на 1 штатную единицу подвижного состава примерно на 3,5 млн. рублей за нормативный срок полезного использования (10 лет) при эксплуатации данного типа подвижного состава, согласно принятой учётной политики ГУП ПАТ [24].

Оценка ожидаемого технико-экономического эффекта применения разработанного метода представлена на рисунке 4.6.

Представленная схема разработана на основе теории, изложенной В. И. Эдельманом, касающейся этапов монтажа и эксплуатации (этап №13) и технической помощи и обслуживания (этап №14) из комплекса этапов системы жизнеобеспечения машин [122].

Данная схема наглядно визуализирует динамику изменения ключевых технико-экономических показателей на протяжении наиболее продолжительного и значимого периода жизненного цикла – эксплуатации агрегата автобуса.

Следует отметить, что выполненный экономический расчет выполнен с использованием ценовых показателей на начало периода эксплуатации подконтрольных автобусов со сроком полезного использования 10 лет [24]. Однако в течение указанного временного промежутка существует высокая вероятность изменения стоимостных характеристик, обусловленная рядом

объективных факторов: инфляция национальной валюты; транспортная политика регионов; политические факторы; технические новации.

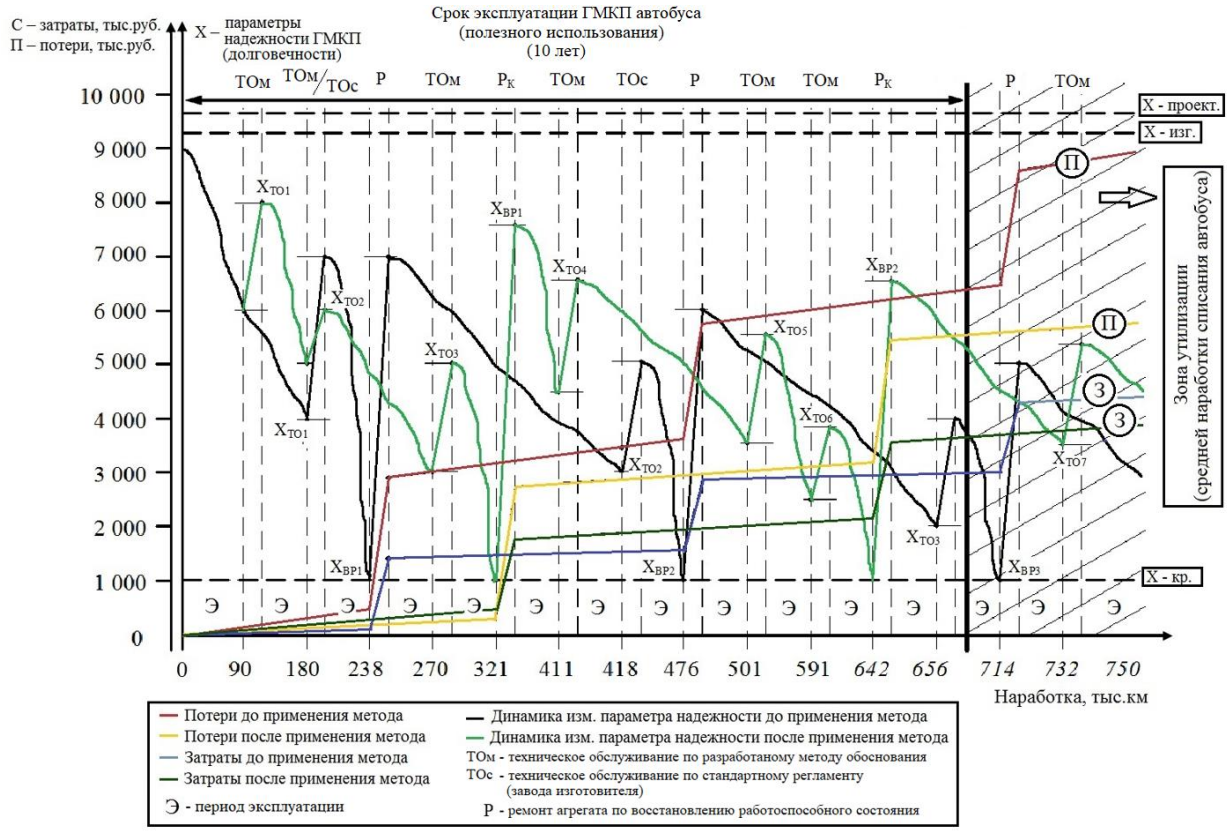


Рисунок 4.6 – Оценка ожидаемого технико-экономического эффекта применения разработанного метода

Поэтому полученный расчет технико-экономического эффекта являются ориентировочным и подлежит постоянной корректировке в зависимости от складывающейся рыночной конъюнктуры и уровня социально-экономической стабильности государства. Рекомендуется периодически обновлять экономические расчёты с целью адаптации модели эксплуатации агрегата АТС к актуальным условиям рынка и минимизировать возможные финансовые риски.

Выводы по главе

1. Усовершенствован метод обоснования периодичности ТО, который в отличие от классического подхода по статистическим вариационным (толерантным) границам распределения наработок на отказ основан на определении предельно допустимых значений значимого диагностического параметра СМ по началу устойчивого увеличения интенсивности изнашивания триботехнической системы, лимитирующей ресурс. Метод статистически и математически обоснован. Он позволяет определять предельно допустимые значения ключевых диагностических параметров СМ до начала периода аварийной эксплуатации, что даёт возможность не просто констатировать факт отказа, а прогнозировать его наступление и обоснованно назначать периодичность ТО, упреждая длительную аварийную эксплуатацию агрегата. На основе усовершенствованного метода установлено, что для исследуемого ГМКП начало аварийной эксплуатации наступает при наработке СМ 90 000 км.

2. Разработаны математическая модель прогнозирования износа слоя фрикционного материала дисков муфты сцепления, в основе которой лежит изменение интенсивности изнашивания триботехнической системы, определяющей долговечность агрегата, а также численная модель и программный модуль оценки ресурса ГМКП по износу фрикционного слоя муфты сцепления с учётом периодичности ТО. Периодичность ТО 90 000 км по усовершенствованному методу увеличивает ресурс исследуемого ГМКП на 83 545 км (+35 %). Также установлено, что дальнейшее сокращение периодичности до 60 000 км и менее не даёт значимого технико-экономического эффекта. Полученные количественные результаты подтверждают рабочую гипотезу исследования: долговечность ГМКП может быть повышена за счёт научно обоснованной периодичности ТО, определяемой по закономерностям изменения параметров триботехнической

системы и свойств СМ от наработки, что позволяет упредить переход эксплуатации агрегата в аварийную стадию.

3. Разработан метод повышения долговечности ГМКП для инженерно-технических служб АТП, эксплуатирующих городские автобусы (корректирование нормативов периодичности ТО, подбор аналогов СМ), и для производителей АТС и агрегатов (обоснование нормативов ТО под конкретные условия эксплуатации). Метод реализуется через последовательность действий и включает четыре этапа: сбор нормативных и исходных данных, анализ состояния и подбор СМ, определение периодичности ТО и прогнозирование ресурса, назначение рациональной периодичности ТО.

4. Подтверждена практическая применимость и значимость разработанного метода в ходе подконтрольных эксплуатационных испытаний на базе ГУП ПАТ. Установлено, что после внедрения метода средняя наработка трех выбранных автобусов Volgabus 627102 CityRhythm 18 составила 171 749 км, при этом признаки нарушения работоспособности или повышенного износа агрегатов отсутствуют.

5. Определён технико-экономический эффект внедрения разработанного метода повышения долговечности. Установлено, что за нормативный срок полезного использования (10 лет) общий ожидаемый экономический эффект на одну единицу подвижного состава составляет – 3,50 млн. руб. (годовой – 0,3 млн руб.). Экономический эффект обусловлен техническим: сокращения ремонтов на 33 %, запасов запчастей на 50 %, простоев АТС и срывов транспортной работы на 36 %. В реультате себестоимость одного километра эксплуатации снизилась на 27,2 %, а эффективность затрат возросла 37,3 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведён анализ эксплуатационной надежности ГМКП, выявлена массово эксплуатируемая модель ГМКП, фактический ресурс которой до капитального ремонта составил 33 % от норматива. Установлены основные признаки отказов: пробуксовка передач и неудовлетворительное состояние СМ. Определена основная причина полных отказов – износ фрикционных дисков муфты сцепления.

2. Экспериментально установлены 19 зависимостей СМ от наработки в муфте сцепления, лимитирующей ресурс агрегата: ФХ параметров (кинематическая вязкость при 40 и 100 °С, кислотное число, плотность, температуры вспышки и застывания); параметров концентраций химических элементов, входящих в состав СМ: накапливаемых (Al, Fe, Cu, Na, Si, нерастворимый осадок, вода); расходуемых (S, P, B, Ca, Zn, Mg) и 2 зависимости триботехнических параметров системы «металлокерамическая поверхность – СМ – стальная поверхность» (коэффициента трения и интенсивность изнашивания). Обоснованы наиболее значимые параметры: по ФХ – кинематическая вязкость при 100°С, концентрация Fe и Ca; по триботехническим – интенсивность изнашивания, изменение которой положено в основу определения начала периода аварийной эксплуатации.

3. Усовершенствован метод обоснования периодичности ТО ГМКП путём определения предельно допустимых значений физико-химических параметров состояния СМ по началу устойчивого увеличения интенсивности изнашивания триботехнической системы, что позволяет упредить аварийный период эксплуатации агрегата.

4. Разработан метод повышения долговечности ГМКП, обеспечивающий увеличение ресурса агрегата до капитального ремонта на 35%, что подтверждено результатами математического моделирования прогнозирования износа фрикционного материала дисков муфты сцепления и численной оценки ресурса с учётом периодичности ТО.

5. Определены направления практической реализации метода повышения долговечности агрегата, позволяющие АТП осуществлять корректирование нормативов ТО, а производителям АТС и агрегатов – обосновывать их более гибко под конкретные условия эксплуатации. Ожидаемый технико-экономический эффект от применения метода за нормативный срок полезного использования (10 лет) одного автобуса: общий экономический эффект – 3,50 млн руб., снижение себестоимость 1 км эксплуатации на 27,2 %, рост эффективности затрат 1 км эксплуатации на 37,3 %.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АТП – автотранспортное предприятие

АТС – автотранспортное средство

БК – большой класс (автобусов)

ВАК – Высшая аттестационная комиссия

ГМКП – гидромеханическая коробка передач

ГУП ПАТ – Санкт-Петербургское государственное унитарное предприятие пассажирского автомобильного транспорта «Пассажиравтотранс»

ДВС – двигатель внутреннего сгорания

МКП – механическая коробка передач

МНК – метод наименьших квадратов

ОБК – особо большой класс (автобуса)

ПРСМ – параметры работающего смазочного материала

ПФЭ – полнофакторный эксперимент

РФ – Российская Федерация

СК – средний класс (автобусов)

СКО – среднеквадратичное отклонение

СМ – смазочный материал

ТО – техническое обслуживание

ТО и Р – техническое обслуживание и ремонт

ФХ – физико-химический

API – American Petroleum Institute (Американский институт нефти)

CAN – Controller Area Network (сеть связи блоков-контроллеров)

ZF – Zahnrad Fabrik (производитель коробок передач)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидромеханическая передача автобуса / М.Н. Дзядык, Ю.К. Есеновский-Лашкой, Н.Д. Мазалов [и др.]. – М. : Транспорт, 1968. – 112 с.

2. Гришкевич, А.И. Проектирование трансмиссий автомобилей : справочник / А.И. Гришкевич, Б.У. Бусел, Г.Ф. Бутусов и др. ; под общ. ред. А.И. Гришкевича. – М. : Машиностроение, 1984. – 268 с.

3. Джерихов, В.Б. Автомобильные эксплуатационные материалы : учеб. пособие. Ч. II. Масла и смазки / В.Б. Джерихов ; СПб. гос. архит.-строит. ун-т. – СПб., 2009. – 256 с. – ISBN 978-5-9227-0135-8.

4. Балтенас, Р. Трансмиссионные масла. Пластичные смазки / Р. Балтенас, А.С. Сафонов, А.И. Ушаков, В. Шергалис. – СПб. : ООО «Изд-во ДНК», 2001. – 208 с. – ISBN 5-7624-0056-5.

5. Рудник, Л.Р. Присадки к смазочным материалам. Свойства и применение / Л.Р. Рудник ; пер. с англ. яз. 2-го изд. под ред. А.М. Данилова. – СПб. : ЦОП «Профессия», 2013. – 928 с. – ISBN 978-5-91884-051-1.

6. Методы контроля и результаты исследования состояния трансмиссионных и моторных СМ при их окислении и триботехнических испытаниях : монография / В.И. Верещагин, В.С. Янович, Б.И. Ковальский [и др.]. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – 208 с. – ISBN 978-5-7638-3679-0.

7. Калявин, В.П. Надёжность и диагностика автотранспортных средств : монография / В.П. Калявин, Н.А. Давыдов. – СПб. : Элмор, 2014. – 480 с. – ISBN 5-7399-0172-3.

8. Техническая эксплуатация автомобилей : учебник для вузов / Е.С. Кузнецов, А.П. Болдин, В.М. Власов и др. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 2004. – 535 с. – ISBN 5-02-002593-3.

9. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – М. : Российский институт стандартизации, 2021. – 35 с.

10. Кудинов, В.И. Обоснование возможности увеличения нормативных сроков службы смазочных материалов для гидромеханических передач : на

примере смазочного материала «А» для гидромеханической передачи автобуса ЛиАЗ-677 : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Кудинов Владимир Иванович. – М., 1986. – 262 с.

11. Кустиков, А.Д. Обоснование корректирования периодичности обслуживаний коробок передач автобусов для условий дорог с переменным продольным профилем : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Кустиков Александр Дмитриевич ; [место защиты: Оренбургский государственный университет]. – Н. Новгород, 2015. – 177 с.

12. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.

13. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.

14. Коваленко, В.А. Диагностика гидромеханических передач : монография / В.А. Коваленко. – Харьков : ХНАДУ, 2014. – 168 с.

15. Аметов, В.А. Повышение эксплуатационной надежности агрегатов автотранспортных средств путем контроля и модифицирования смазочного масла : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.10 / Аметов Владимир Александрович. – Тюмень, 2006. – 368 с.

16. Ляпин, С.А. Повышение эффективности эксплуатации городских автобусов за счет управления надежностью гидромеханических передач : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Ляпин Сергей Александрович ; Ленинградский инженерно-строительный институт. – Л., 1990. – 357 с.

17. Власов, Ю.А. Методология диагностики агрегатов автомобилей электрофизическими методами контроля параметров работающего масла : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.10 / Власов Юрий Алексеевич ; [место защиты: Иркутский государственный технический университет]. – Иркутск, 2015. – 368 с.

18. Пильщиков, В.Л. Повышение срока службы масла в гидромеханических коробках передач транспортных машин : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Пильщиков Владимир Леонидович. – М., 1986. – 208 с.

19. Гордивский, В.Н. Способ определения оптимальных сроков замены трансмиссионного масла / В.Н. Гордивский, В.Ю. Гумелёв, В.В. Череватенко // Портал научно-практических публикаций. – 2014. – URL: https://portalnp.snauka.ru/2014/01/8877 (дата обращения: 11.10.2022).

20. Селезнев, М.В. Регенерация отработанных трансмиссионных масел и их использование в автомобильных трансмиссиях (на примере автомобилей КамАЗ) : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Селезнев Максим Владимирович. – Пенза, 2015. – 177 с.

21. Маньшев, Д.А. Результаты оценки показателей качества трансмиссионного масла при эксплуатации / Д.А. Маньшев, М.В. Селезнев // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 7 (86). – С. 49–58. – EDN OUZMFX.

22. Орехов, В.В. Исследование надежности гидромеханических коробок передач городских автобусов в условиях эксплуатации / В.В. Орехов // Вестник УрГУПС. – 2023. – № 2 (58). – С. 142–150. – DOI 10.20291/2079-0392-2023-2-142-150.

23. Надёжность и эффективность эксплуатации транспортно-технологических машин / С.В. Репин, С.А. Евтюков, А.В. Зазыкин, К.В. Рулис. – СПб. : Петрополис, 2016. – 404 с.

24. О классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы : постановление Правительства РФ от 01.01.2002 № 1 // КонсультантПлюс : сайт. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34710/ (дата обращения: 29.01.2026).

25. Балтенас, Р. Моторные масла / Р. Балтенас, А.С. Сафонов, А.И. Ушаков, В. Шергалис. – М. ; СПб. : Альфа-Лаб, 2000. – 272 с. – ISBN 5-7713-0028-4.

26. Фитч, Дж. Анализ масел. Основы и применение / Дж. Фитч, Д. Тройер ; пер. с англ. яз. 2-го изд. под ред. Е.А. Новикова, М.В. Кирюхина. – СПб. : Профессия, 2015. – 166 с. – ISBN 978-5-91884-064-1.

27. Смирнова, Н.Н. Инфракрасная спектроскопия в химии высокомолекулярных соединений : учеб. пособие / Н.Н. Смирнова, В.Ю. Чухланов ; Владимирский гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2021. – 84 с. – ISBN 978-5-9984-1406-0.

28. Орехов, В.В. Оценка трансмиссионных масел, применяемых при эксплуатации гидромеханических коробок передач / В.В. Орехов // Вестник УрГУПС. – 2024. – Т. 61, № 1. – С. 101–109. – EDN HQOZWN.

29. Орехов, В.В. Анализ трансмиссионных масел, применяемых при эксплуатации гидромеханических коробок передач автобусов / В.В. Орехов // Механики XXI веку. – 2024. – № 23. – С. 355–362. – EDN GPFOON.

30. Хазиев, А.А. Теоретические аспекты анализа изменения свойств моторного масла методом инфракрасной спектрометрии с разложением в ряд Фурье / А.А. Хазиев, А.В. Лаушкин, Б.С. Борисов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2014. – № 2. – С. 97–103.

31. Иванкин, А.Н. Физико-химические методы анализа. Спектрометрия : учеб. пособие / А.Н. Иванкин, Г.Л. Олиференко, В.А. Беляков, Н.Л. Вострикова. – М. : МГУЛ, 2016. – 127 с.

32. DIN 51453:2024-08. Testing of lubricants – Determination of oxidation and nitration of used motor oils – Infrared spectrometric method. – Berlin : German Institute for Standardization, 2024.

33. Химия нефти и газа : учеб. пособие / А.И. Богомолов, А.А. Гайле, В.В. Громова, А.Е. Драбкин [и др.] ; под ред. В.А. Проскурнякова, А.Е. Драбкина. – 3-е изд., доп. и испр. – СПб. : Химия, 1995. – 448 с. – ISBN 5-7245-1023-5.

34. API 1509. Engine Oil Licensing and Certification System. – 23rd ed. – American Petroleum Institute, February 2025.

35. Гаркунов, Д.Н. Триботехника : учеб. пособие для вузов / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк. – 2-е изд., стер. – М. : Кнорус, 2024. – 408 с.

36. Хопин, П.Н. Трибология : учебник для вузов / П.Н. Хопин, С.В. Шишкин. – М. : Юрайт, 2024. – 236 с.

37. Трибология – машиностроению : труды XV Международной научно-технической конференции (Трибомаш-2024) / Р.Ф. Ганиев, И.А. Буяновский, В.П. Бирюков, Л.И. Куксенова, В.И. Савенко [и др.]. – М. : ИМАШ РАН, 2024. – 252 с.

38. Farfan-Cabrera, L.I. Electric vehicle tribology : challenges and opportunities for a sustainable transportation future / L.I. Farfan-Cabrera, A. Erdemir. – 1st ed. – Amsterdam : Elsevier, 2024. – 450 p.

39. Wani, M.F. High-temperature tribology of ceramics and ceramic matrix composites / M.F. Wani, J.K. Katiyar, R. Sehgal. – 1st ed. – Amsterdam : Elsevier, 2024. – 350 p.

40. Beake, B. Nanomechanics for coatings and engineering surfaces : test methods, development strategies, modeling approaches, and applications / B. Beake, T. Liskiewicz. – 1st ed. – Amsterdam : Elsevier, 2024. – 400 p.

41. Stolarski, T.A. Tribology in machine design / T.A. Stolarski. – 2nd ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2000. – 298 p.

42. Мур, Д.Ф. Основы и применения трибоники / Д.Ф. Мур ; пер. с англ. С.А. Харламова ; под ред. И.В. Крагельского, Г.И. Трояновской. – М. : Мир, 1978. – 487 с.

43. Жальников, Е.П. Основы триботехники : учеб. для вузов / Е.П. Жальников, В.Н. Самсонов. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 136 с. – ISBN 978-5-7883-0919-4.

44. Пенкин, Н.С. Основы трибологии и триботехники : учеб. пособие / Н.С. Пенкин, А.Н. Пенкин, В.М. Сербин. – 2-е изд., стереотип. – М. : Машиностроение, 2012. – 208 с. – ISBN 978-5-94275-583-6.

45. Большаков, Г.Ф. Физико-химические основы применения топлив и масел. Теоретические аспекты химмотологии / Г.Ф. Большаков ; отв. ред. Н.К. Надиров ; АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т химии нефти. – Новосибирск : Наука, 1987. – 209 с.

46. Папок, К.К. Основные задачи в области химмотологии на современном этапе / К.К. Папок // Химия и технология топлив и масел. – 1977. – № 4. – С. 3–6.

47. Папок, К.К. Химмотология топлив и смазочных масел / К.К. Папок ; науч. ред. А.Б. Виппер. – М. : Воениздат, 1980. – 192 с.

48. Сафонов, А.С. Химмотология горюче-смазочных материалов / А.С. Сафонов, А.И. Ушаков, В.В. Гришин. – СПб. : НПИКЦ, 2007. – 488 с.

49. Фукс, И.Г. Основы химмотологии : учеб. пособие / И.Г. Фукс, В.Г. Спиркин, Т.Н. Шабалина ; Российский гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина. – М. : Нефть и газ, 2004. – 279 с. – ISBN 5-7246-0311-X.

50. Mang, T. Lubricants and lubrication / T. Mang, W. Dresel. – 3rd ed. – Weinheim : Wiley-VCH, 2017. – 898 p. – ISBN 978-3-527-33458-8.

51. Mortier, R.M. Chemistry and technology of lubricants / R.M. Mortier, M.F. Fox, S.T. Orszulik. – 3rd ed. – Dordrecht : Springer, 2010. – 560 p. – ISBN 978-1-4020-8661-8.

52. Rudnick, L.R. Lubricant additives : chemistry and applications / L.R. Rudnick. – 3rd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2017. – 770 p. – ISBN 978-1-4987-0364-6.

53. ГОСТ Р 18436-4-2012. Контроль состояния и диагностика машин. Требования к квалификации и оценке персонала. Часть 4. Метод анализа масла в условиях эксплуатации. – М. : Стандартинформ, 2019. – 20 с.

54. Снеговский, Ф.П. Экспериментальные основы теории термоупругогидродинамической смазки машин / Ф.П. Снеговский // Контактная гидродинамика : тезисы докладов VI Всероссийской конференции, 19–21 июня 1996 г. – Самара : Самарский государственный аэрокосмический университет, 1996. – С. 17–18.

55. Соколов, А.И. Оценка работоспособности машин по параметрам работающего СМ / А.И. Соколов, Н.Т. Тищенко, В.А. Аметов. – Томск : Изд-во Томского университета, 1991. – 200 с.

56. Stodola, J. Analysis of the internal combustion engine wear mode / J. Stodola, P. Stodola, J. Furch // Advances in Engineering Research and Application : proceedings of the International Conference on Engineering Research and Application (ICERA 2023) / ed. by D.C. Nguyen [et al.]. – Cham : Springer, 2024. – P. 213–221. – DOI 10.1007/978-3-031-62238-0_20.

57. Cortes-Morales, M.C. Qualitative analysis of submicron particles in degraded lubricant / M.C. Cortes-Morales, V. Benavides, A. Naveira Suarez, R. Larsson, P. Marklund // Tribology Transactions. – 2025. – Vol. 68, no. 4. – P. 690–700. – DOI 10.1080/10402004.2025.2503842.

58. Wang, S. An integrated knowledge and data model for adaptive diagnosis of lubricant conditions / S. Wang, J. Zhou, T. Wu, H. Wei, Z. Han // Tribology International. – 2024. – Vol. 199. – Art. no. 109914. – DOI 10.1016/j.triboint.2024.109914.

59. Шалыгин, М.Г. Исследование физико-химических и противоизносных свойств моторных масел по завершении процесса эксплуатации / М.Г. Шалыгин, А.П. Ващишина, С.П. Ващишин // Транспортное машиностроение. – 2024. – № 3 (27). – С. 12–19.

60. Никитенко, М.С. Перспективы мониторинга работоспособности моторного масла карьерного автотранспорта / М.С. Никитенко, Д.Ю. Худоногов, М.В. Ефременкова // Горная промышленность. – 2025. – № 5. – С. 160–166. – DOI 10.30686/1609-9192-2025-5-160-166.

61. Лоренц, В.Ф. Изнашивание трущихся деталей / В.Ф. Лоренц. – М. : Мир, 1964. – 211 с.

62. Лоренц, В.Ф. Износ деталей сельскохозяйственных машин : (методика экспериментальных исследований) / В.Ф. Лоренц ; Министерство сельскохозяйственного машиностроения СССР, Всесоюзный научно-

исследовательский институт сельскохозяйственного машиностроения ВИСХОМ. – М. : Машгиз, 1948. – 98 с.

63. Толочко, Н.К. Основы триботехники. Практикум : учеб.-метод. пособие / Н.К. Толочко, В.Е. Тарасенко ; БГАТУ, Кафедра технологий и организации технического сервиса. – Минск : БГАТУ, 2020. – 121 с. – ISBN 978-985-25-0032-6.

64. Pan, J. Application of correlation analysis in oil monitoring and fault diagnosis / J. Pan // Lubrication Engineering. – 2016. – No. 4. – P. 128–131.

65. Xu, F. Method for abnormal wear diagnosis and component localization of transmission system based on lubricating oil spectral data / F. Xu, Q. Zhang, W. Ji [et al.] // Spectroscopy and Spectral Analysis. – 2024. – Vol. 44, no. 5. – P. 1398–1404. – DOI 10.3964/j.issn.1000-0593(2024)05-1398-07.

66. Керученко, Л.С. Использование статистических методов для оценки предельного содержания продуктов износа в моторных маслах / Л.С. Керученко, Е.И. Мальцева // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2016. – № 1 (21). – С. 255–260. – EDN VVQHVX.

67. Вершинина, О.Г. Разработка метода диагностирования фрикционов гидромеханической коробки передач городского автобуса : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Вершинина Ольга Геннадьевна. – Тюмень, 2003. – 153 с.

68. Naunheimer, H. Automotive transmissions : fundamentals, selection, design and application / H. Naunheimer, B. Bertsche, J. Ryborz, W. Novak ; in collaboration with P. Fietkau ; transl. by A. Kuchle. – 2nd ed. – Berlin : Springer, 2011. – 715 p. – ISBN 978-3-642-16213-8.

69. Дерябин, А.А. Смазка и износ дизелей / А.А. Дерябин. – Л. : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1974. – 183 с.

70. SAE J1646-2006. Glossary of terms – lubricated friction systems. – Warrendale : SAE International, 2006. – 12 p.

71. Григорьев, М.А. Очистка масла и топлива в автотракторных двигателях / М.А. Григорьев. – М. : Машиностроение, 1970. – 270 с.

72. Григорьев, М.А. Техническая эксплуатация автомобилей : учебник / М.А. Григорьев, Ю.А. Власов. – М. : Транспорт, 2018. – 312 с.

73. Кравцов, В.В. Влияние динамической нагруженности на износ зубчатых передач трансмиссий автомобилей / В.В. Кравцов, А.И. Новиков // Трение и износ. – 2020. – Т. 41, № 3. – С. 312–318. – DOI 10.3103/S1068366620030088.

74. SAE J3087-2018. Automatic Transmission Hydraulic Fluids – Classification, Definitions, and Specifications. – Warrendale : SAE International, 2018. – 15 p.

75. Соколов, А.И. Применение эмиссионного спектрального анализа масла для оценки износа и свойств работающего масла / А.И. Соколов, Н.Т. Тищенко. – Томск : Издательство Томского государственного университета, 1979. – 208 с.

76. Гаскаров, Д.В. Применение математического программирования в дискриминантном анализе для решения задачи прогнозирования / Д.В. Гаскаров, К.П. Голоскоков, А.В. Шкабардня // Автоматика и телемеханика. – 1988. – № 7. – С. 174–181. – EDN VLYRKV.

77. ГОСТ 9.512-96. Единая система защиты от коррозии и старения. Средства временной противокоррозионной защиты. Метод определения защитной способности смазочных материалов от фреттинг-коррозии. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 8 с.

78. ГОСТ ISO 4263-4-2013. Нефть и нефтепродукты. Определение характеристик старения ингибированных масел и жидкостей. Метод TOST. Часть 4. Промышленные трансмиссионные масла. – М. : Стандартинформ, 2019. – 12 с.

79. Венцель, С.В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания / С.В. Венцель. – М. : Химия, 1979. – 240 с.

80. Тиличеев, М.Д. Действие серной кислоты на ароматические углеводороды и связи с количественным определением их в бензинах / М.Д.

Тиличеев, А.И. Думская // Нефтяное хозяйство. – 2025. – № 10. – С. 78–85. – DOI 10.0000/12345678.

81. Справочник по триботехнике : в 3 т. Т. 1 : Теоретические основы / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение ; Варшава : ВКЛ, 1989. – 397 с. – ISBN 5-217-00688-8.

82. Волкова, Л.К. Влияние кислотности среды на скорость реакций окислительной функционализации углеводородов в сернокислотных растворах / Л.К. Волкова, И.А. Опейда // Кинетика и катализ. – 2020. – Т. 61, № 4. – С. 509–519. – DOI 10.31857/S0453881120040109.

83. Потехин, В.М. Химия и технология углеводородных газов и газового конденсата : учебник для вузов / В.М. Потехин. – 5-е изд., испр. и доп. – СПб. : Лань, 2025. – 776 с. – ISBN 978-5-507-50273-8.

84. Лебедев, Н.Н. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза : учебник для вузов / Н.Н. Лебедев. – 4-е изд., перераб. – М. : Химия, 1988. – 589 с.

85. Орехов, В.В. Результаты оценки износа трансмиссионного масла для гидромеханических коробок передач автобусов в процессе эксплуатации / В.В. Орехов, В.Г. Назаркин // Вестник УрГУПС. – 2024. – Т. 62, № 2. – С. 74–86. – EDN AMTSAE.

86. Орехов, В.В. Экспериментальные исследования физико-химических параметров трансмиссионного смазочного материала в процессе эксплуатации гидромеханических коробок передач автобусов / В.В. Орехов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2026. – № 1 (84). – С. 98–106. – EDN MASFPC.

87. Орехов, В.В. Результаты оценки износа трансмиссионного масла Valvoline Light & HD ATF-CVT в процессе эксплуатации городских автобусов / В.В. Орехов // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств : материалы XXVI Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти профессора Юрия Васильевича Баженова, Владимир, 21–22 ноября 2024 года. – Владимир : Владимирский

государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2024. – С. 66–79. – EDN ZDSBRS.

88. Орехов, В.В. Триботехнические исследования трансмиссионного масла в процессе эксплуатации городских автобусов / В.В. Орехов // Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта : сб. науч. тр. / МАДИ. – М., 2025. – С. 30–36. – EDN MIKWOP.

89. Шец, С.П. Исследование процесса изнашивания трибосопряжений типа «вал – втулка» при граничной смазке / С.П. Шец, А.Е. Могилев // Новые горизонты : XII научно-практическая конференция с международным участием : сборник материалов и докладов, Брянск, 15 апреля 2025 года. – Брянск : Брянский государственный технический университет, 2025. – С. 181–185. – EDN WARGLU.

90. Триботехника : учебник для вузов / под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2003. – 400 с. – ISBN 5-217-00755-8.

91. Жданов, А.Г. Основы триботехники. Смазочные материалы и рабочие жидкости, применяемые в подъемно-транспортных и дорожных машинах : конспект лекций / А.Г. Жданов, Н.В. Назарова, В.П. Малышев ; Самарский государственный университет путей сообщения. – Самара : СамГУПС, 2011. – 126 с.

92. Орехов, В.В. Экспериментальные исследования триботехнических параметров трансмиссионного смазочного материала в процессе эксплуатации гидромеханических коробок передач / В.В. Орехов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2025. – № 2 (81). – С. 111–119. – EDN PTXIQB.

93. СП 34.13330.2021. Автомобильные дороги : свод правил : утв. Приказом Минстроя России от 27.12.2024 № 94/пр. : введ. с 28.01.2025. – М. : Стандартинформ, 2025. – 86 с.

94. Алимова, З.Х. Исследования причины загрязнения смазочных материалов, применяемых в двигателях транспортных средств / З.Х. Алимова,

Б.Р. Шамансуров, И.А. Мирзабоев // Экономика и социум. – 2021. – № 11-1 (90). – С. 705–710. – EDN KOIPQZ.

95. Окисление нефтяных смазочных масел в условиях хранения и применения // Справочник химика 21 : сайт. – URL: https://www.chem21.info (дата обращения: 11.12.2025).

96. Бухаров, С.В. Химия и технология антиоксидантов химических и биологических систем : учеб. пособие / С.В. Бухаров, Г.Н. Нугуманова. – Казань : КНИТУ, 2018. – 152 с.

97. О требованиях к смазочным материалам, маслам и специальным жидкостям : ТР ТС 030/2012 : принят Решением Совета Евразийской экономической комиссии от 20.07.2012 № 59 // Официальный сайт Евразийской экономической комиссии. – URL: http://www.eurasiancommission.org (дата обращения: 21.11.2025).

98. ГОСТ 2477-2014. Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды. – Введ. 2015-07-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 12 с.

99. Saltelli, A. Global Sensitivity Analysis : The Primer / A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, S. Tarantola. – Chichester : Wiley, 2008. – 304 p. – ISBN 978-0-470-05997-5.

100. Сысоев, А.С. Редукция иерархических моделей: чувствительность по факторам на основе анализа конечных изменений / А.С. Сысоев, А.К. Погодаев, П.В. Сараев // Управление большими системами. – 2025. – Вып. 113. – С. 21–36.

101. ГОСТ Р 57188-2016. Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2018. – 12 с.

102. Кофанов, Ю.Н. Электронная инженерия: теория параметрической чувствительности систем : монография / Ю.Н. Кофанов. – М. : ИНФРА-М, 2024. – 152 с. – ISBN 978-5-16-020784-1.

103. Материалы в машиностроении. Выбор и применение : справочник : в 5 т. / под общ. ред. И.В. Кудрявцева. – М. : Машиностроение, 1968. – 446 с.

104. ZF Friedrichshafen AG. ZF-EcoLife : руководство по эксплуатации / арт. 5862.760.452. – Friedrichshafen : ZF Friedrichshafen AG, 2021. – 60 с.

105. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Макарова, Ю.В. Грановский ; АН СССР, Науч. совет по комплексной проблеме «Кибернетика», Секция «Мат. теория эксперимента». – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1976. – 279 с.

106. Песков, В.И. Конструкция автомобильных трансмиссий : учеб. пособие / В.И. Песков. – М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2023. – 146 с. – ISBN 978-5-16-016247-8.

107. Глубокий, В.И. Расчет гидравлических приводов станочного оборудования : учеб.-метод. пособие по курсовому проектированию по дисц. «Гидропривод и гидропневмоавтоматика» для студ. машиностроит. спец. / В.И. Глубокий. – Минск : БНТУ, 2005. – 80 с. – ISBN 985-479-106-8.

108. Чмиль, В.П. Гидропневмопривод строительной техники. Конструкция, принцип действия, расчёт : учеб. пособие / В.П. Чмиль. – СПб. : Лань, 2011. – 320 с. – ISBN 978-5-8114-1129-0.

109. Ливотов, В.С. Технологические расчёты упругих элементов. Часть I. Поверочные расчёты витых пружин и пружинных колец / В.С. Ливотов, А.С. Просвиров, А.В. Напалков. – Волгоград : ОАО Волгоградский завод тракторных деталей и нормалей, 2002. – 16 с.

110. ГОСТ 23.224-86. Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 12 с.

111. Гаркунов, Д.Н. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин / Д.Н. Гаркунов, П.И. Корник. – М. : Изд-во МСХА, 2003. – 344 с.

112. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления : в 3 т. Т. 1 / Г.М. Фихтенгольц. – 8-е изд. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 680 с. – ISBN 5-9221-0156-0.

113. Ильин, В.А. Математический анализ : учебник для вузов : в 2 ч. Ч. 1 / В.А. Ильин, В.А. Садовничий, Бл.Х. Сендов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Проспект, 2016. – 660 с. – ISBN 978-5-392-19765-7.

114. Бугров, Я.С. Дифференциальное и интегральное исчисление : учебник для вузов / Я.С. Бугров, С.М. Никольский. – 3-е изд., перераб. – Ростов н/Д : Феникс, 2004. – 512 с. – ISBN 5-222-04648-9.

115. Кудрявцев, Л.Д. Курс математического анализа : учебник для вузов : в 3 т. Т. 1 / Л.Д. Кудрявцев. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Дрофа, 2003. – 704 с. – ISBN 5-7107-4119-1.

116. Устенко, А.С. Основы математического моделирования и алгоритмизации : монография / А.С. Устенко. – Иваново : Ивановский государственный химико-технологический университет, 2012. – 420 с. – ISBN 978-5-9616-0420-3.

117. Лютикова, Л.А. Процедура направленного поиска корректных операций над алгоритмами / Л.А. Лютикова, Е.В. Шматова // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2016. – № 4-1 (16). – С. 107–111. – DOI 10.18454/2079-6641-2016-16-4-1-107-111.

118. Вальнев, В.В. Автоматизация процесса управления техническим обслуживанием и ремонтом промышленного оборудования на основе методов машинного обучения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 2.3.3 / Вальнев Владимир Владимирович ; Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II. – СПб., 2025. – 20 с.

119. Кузнецов, Е.С. Управление техническими системами : учеб. пособие / Е.С. Кузнецов. – М. : МАДИ (ТУ), 2001. – 262 с.

120. Туревский, И.С. Экономика отрасли (автомобильный транспорт) : учебник / И.С. Туревский. – М. : ИНФРА-М, 2026. – 288 с. – ISBN 978-5-16-021692-8.

121. Будрин, А.Г. Экономика автомобильного транспорта / А.Г. Будрин, Е.В. Будрина, М.Г. Григорян ; под ред. А.Г. Будрина. – 5-е изд., перераб. – М. : Издательский центр «Академия», 2016. – 320 с. – ISBN 978-5-4468-2780-0.

122. Эдельман, В.И. Надежность технических систем: экономическая оценка / В.И. Эдельман. – М. : Экономика, 1988. – 151 с.

123. Bosman, R. On the transition from mild to severe wear of lubricated, concentrated contacts: The IRG (OECD) transition diagram / R. Bosman, D.J. Schipper // Wear. – 2010. – Vol. 269, no. 11-12. – P. 899–906.

124. Hutchings, I. Lubricated wear / I. Hutchings, P. Shipway // Tribology. – 2nd ed. – Elsevier, 2017. – P. 149–155.

125. Al-Samarai, R.A. Friction and Wear in Metals / R.A. Al-Samarai, Y. Al-Douri. – Singapore : Springer, 2024. – 267 p.

126. ГОСТ 30858-2003. Обеспечение износостойкости изделий. Триботехнические требования и показатели. Принципы обеспечения. Общие положения. – Введ. 2006-01-01. – М. : Стандартинформ, 2005. – 12 с.

127. ГОСТ Р 50740-95. Триботехнические требования и показатели. Принципы обеспечения. Общие положения. – Введ. 1996-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1995. – 12 с.

128. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.

129. ГОСТ 23.002-93. Система обеспечения надежности в машиностроении. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. – Введ. 1995-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1994. – 24 с.

130. МР 125-87. Испытания машин трения. Методы определения триботехнических характеристик : методические рекомендации. – М. : ВНИИНМАШ, 1987. – 32 с.

131. Буяновский, И.А. Оценка критических режимов трения по изменению триботехнических характеристик / И.А. Буяновский, А.В. Крылов // Трение и износ. – 2015. – Т. 36, № 4. – С. 387–394.

132. Назаркин, В.Г. Методология научного творчества : учеб. пособие / В.Г. Назаркин, В.Е. Сергеенков, Н.И. Веревкин, Н.А. Давыдов. – СПб. : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2011. – 32 с. – ISBN 978-5-9227-0282-9. – EDN RYRZFB.

133. Назаркин, В.Г. Восстановление деталей военной автомобильной техники лазерной наплавкой : дис. ... канд. техн. наук : 20.02.17. / Назаркин Виктор Гаврилович. – Л. : ВАТТ, 1991. – 167 с.

134. Туркеев, Г.Г. Надёжность автомобилей : учеб. пособие / Г.Г. Туркеев. – М. : Машиностроение, 2015. – 276 с. – ISBN 978-5-94275-734-4.

135. Шейнин, А.М. Основы теории надёжности машин : учеб. пособие / А.М. Шейнин. – М. : Инфра-Инженерия, 2020. – 192 с. – ISBN 978-5-16-015312-4.

136. Bertsche, B. Reliability in automotive and mechanical engineering : determination of component and system reliability / B. Bertsche. – Berlin : Springer, 2008. – 500 p. – (VDI-Buch). – ISBN 978-3-540-33969-4.

137. Dhillon, B.S. Applied reliability for engineers / B.S. Dhillon. – Boca Raton : CRC Press, 2024. – 216 p. – ISBN 978-1-032-24191-3.

138. Dhillon, B.S. Reliability, maintainability, and safety for engineers / B.S. Dhillon. – Boca Raton : CRC Press, 2021. – 136 p. – ISBN 978-1-032-24191-3.

139. Müller, J.R. Die formalisierte Terminologie der Verlässlichkeit technischer Systeme / J.R. Müller. – Berlin : Springer Vieweg, 2015. – 240 p. – ISBN 978-3-662-46921-7.

140. Мазалов, Н.Д. Гидромеханические коробки передач / Н.Д. Мазалов, С.М. Трусов. – М. : Машиностроение, 1971. – 296 с.

141. Аринин, И.Н. Техническая диагностика на предприятиях автомобильного транспорта / И.Н. Аринин. – Ярославль : Верхне-Волжское книжное издательство, 1974. – 144 с.

142. Аринин, И.Н. Диагностирование технического состояния автомобиля / И.Н. Аринин. – М. : Транспорт, 1978. – 176 с.

143. Савич, Е.Л. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей : учеб. пособие / Е.Л. Савич, А.С. Гурский. – Минск : Вышэйшая школа, 2019. – 429 с. – ISBN 978-985-503-959-5.

144. Острейковский, В.А. Теория надёжности : учебник для вузов / В.А. Острейковский. – 3-е изд., испр. – М. : Юрайт, 2020. – 380 с. – ISBN 978-5-534-03805-3.

145. Пронин, Б.А. Конструкция и расчёт автомобилей : учебник / Б.А. Пронин, В.П. Бойко. – М. : Машиностроение, 2019. – 456 с. – ISBN 978-5-907104-62-8.

146. Захаров, Н.С. Конструкция, расчёт и потребительские свойства автомобилей : учеб. пособие / Н.С. Захаров. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2016. – 256 с. – ISBN 978-5-9961-1245-0.

147. Индикт, Е.А. Диагностика и техническое обслуживание машин : учеб. пособие / Е.А. Индикт. – М. : КолосС, 2010. – 280 с. – ISBN 978-5-9532-0760-1.

148. Корчажкин, М.Г. Трансмиссии автомобилей : учеб. пособие / М.Г. Корчажкин. – М. : Машиностроение, 2015. – 312 с. – ISBN 978-5-94275-765-8.

149. Патент № 2748781 C1 Российская Федерация, МПК G07C 5/08. Способ оперативной индивидуальной корректировки периодичности технического обслуживания автотранспортного средства : № 2020125278 : заявл. 21.07.2020 : опубл. 31.05.2021 / И.О. Черняев. – EDN KTUVPI.

150. Кривенко, Е.И. Основы теории надёжности технических систем : учеб. пособие / Е.И. Кривенко. – М. : Юрайт, 2021. – 196 с. – ISBN 978-5-534-12745-0.

151. Кузьмин, В.С. Трансмиссии колёсных и гусеничных машин : учебник / В.С. Кузьмин. – М. : Машиностроение, 2019. – 288 с. – ISBN 978-5-907104-78-9.

152. Ушенин, А.С. Расчетно-экспериментальный метод повышения надежности элементов гидромеханической трансмиссии специального колесного шасси на основе отстройки параметрических субгармонических резонансов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.03 / Ушенин Андрей Сергеевич ; [место защиты: Уральский государственный университет]. – Курган, 2013. – 19 с.

153. Трехступенчатая гидромеханическая передача автобуса / В.В. Баранов, О.И. Гируцкий, М.Н. Дзядык [и др.]. – М. : Транспорт, 1980. – 151 с.

154. Харитонов, С.А. Автоматические коробки передач / С.А. Харитонов. – М. : Астрель : АСТ, 2003. – 334 с. – ISBN 5-17-017670-8.

155. Макарова, А.Н. Методика оперативного корректирования нормативов периодичности технического обслуживания с учетом фактических условий эксплуатации автомобилей : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Макарова Анна Николаевна. – Оренбург, 2016. – 208 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Документы, подтверждающие практическую значимость исследования

Санкт-Петербургское
государственное унитарное предприятие
пассажирского автомобильноготранспорта
(СПб ГУП «ПАССАЖИРАВТОТРАНС»)

Полюстровский пр. д. 39, Санкт-Петербург, 195197
тел.: (812) 331-70-30, факс:(812) 540-19-98 e-mail:info@avtobus.spb.ru http://www.avtobus.spb.ru
ОКПО 05142928 ОКОГУ 49003 ОГРН 1027809247300 ИНН/КПП 7830001758/785150001

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер –
заместитель генерального директора
СПб ГУП «ПАССАЖИРАВТОТРАНС»
_____ А.Н. Беляев
«31» _____ 2025 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Орехова Виталия Владимировича

«МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ АВТОБУСОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ»

в практическую деятельность СПб ГУП «ПАССАЖИРАВТОТРАНС»

Комиссия в составе:

Председателя комиссии:

Вайзнер В.Э. – Заместитель главного инженера - начальник ПТУ

Членов комиссии:

Чмиль Ю.В. – Начальник Управления ресурсного обеспечения

Корзин А.В. – Начальник технического отдела ПТУ

Настоящим актом свидетельствует о том, что в период с 31.10.2022 по 30.12.2024 в СПб ГУП «ПАССАЖИРАВТОТРАНС» (далее – Предприятие) аспирантом Ореховым В.В. были проведены исследования, в результате которых

разработанные научные положения внедрены в практическую деятельность Предприятия, а именно: метода определения периодичности технического обслуживания (замена смазочных материалов и фильтрующих элементов) агрегатов трансмиссии городских автобусов.

Результаты внедрения в рамках исследования повышения долговечности гидромеханических коробок передач автобусов были рассмотрены и одобрены на заседании комиссии. Применение результатов диссертационного исследования признано целесообразным к применению в технической стратегии Предприятия при эксплуатации городских автобусов марок Volgabus, МАЗ, НЕФАЗ.

Комиссия свидетельствует о том, что внедрение научных результатов диссертационной работы аспиранта ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» аспиранта Орехова В.В. обладает практической ценностью. Их использование может привести к увеличению фактического среднего ресурса гидромеханических коробок передач на 35-40%, что, в свою очередь, позволит снизить затраты и убытки, связанные с полными отказами при выполнении транспортной работы.

Председатель комиссии:

Заместитель главного инженера - начальник
Производственно-технического управления В.Э. Вайзнер

Члены комиссии:

Начальник технического отдела
Производственно-технического управления А.В. Корзин

Начальник Управления ресурсного обеспечения Ю.В. Чмиль

«31» 01 2025 г.

ДОМТРАНСАВТО
(обособленное подразделение г. Санкт-Петербург)
196655, г. Санкт-Петербург, город Колпино вн.тер.г.,
г. Колпино, ул. Колпинская, д. 8 литер А
тел: +7(495)1368448, +7(931) 3520028 e-mail: dtaspb@domtransauto.ru

Общество с ограниченной ответственностью «ДОМТРАНСАВТО»
(ООО «ДОМТРАНСАВТО»)

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный Директор
ООО «ДОМТРАНСАВТО»

_____ Е.В.Старшинов

«07» *мая* 2026 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Орехова Виталия Владимировича

«МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ АВТОБУСОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ»

Комиссия ООО «ДОМТРАНСАВТО» в составе:

Председателя комиссии:
Кузнецов А.В. – Главный инженер
Членов комиссии:
Моисеенков К.В – Начальник площадки №1
Кондратенко А.К. – Старший контролер

Свидетельствует о том, что рассмотрела вопрос об использовании результатов диссертационной работы Орехова Виталия Владимировича и установила следующее.
Результаты диссертационного исследования внедрены в техническую стратегию развития предприятия, данные материалы используются при формировании внутренней нормативной документацией по техническому обслуживанию городских автобусов в процессе эксплуатации.
Применение предложенного метода позволит повысить долговечность гидромеханических коробок передач городских автобусов при эксплуатации за счёт предотвращения работы агрегата в критическом аварийном режиме, что обеспечит положительный технико-экономический эффект.

Председатель комиссии:
Главный инженер А.В.Кузнецов

Члены комиссии:
Начальник площадки №1 К.В.Моисеенков

Старший контролер А.К.Кондратенко

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»
(СПбГАСУ)
ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, 190005

10.06.2026 № 2А-ОД-02

о внедрении научных результатов диссертации в образовательный процесс

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по образовательной деятельности
_____ С.В. Михайлов
10 июня 2026 г.

АКТ
о внедрении научных результатов диссертации в образовательный процесс

На основании решения Учебно-методической комиссии автомобильно-дорожного факультета (Протокол от 29.05.26 № 5) научные результаты диссертации «Метод повышения долговечности гидромеханических коробок передач автобусов при эксплуатации» на соискание ученой степени кандидата технических наук автора Орехова Виталия Владимировича, аспиранта кафедры технической эксплуатации транспортных средств:

- экспериментально установленные зависимости изменения физико-химических параметров смазочного материала от наработки при эксплуатации гидромеханических коробок передач автобусов;

- экспериментально установленные триботехнические зависимости (коэффициент трения и интенсивность изнашивания от наработки смазочного материала) системы «металлокерамическая поверхность – смазочный материал – стальная поверхность», моделирующей фрикционное сопряжение в муфте сцепления – узле, лимитирующем ресурс агрегата;

- разработанный метод обоснования периодичности технического обслуживания гидромеханических коробок передач городских автобусов,

заключающийся в переходе от стандартных подходов к адаптивному, учитывающему фактическое физико-химическое состояние смазочных материалов и триботехнические характеристики системы;

- разработанная математическая модель прогнозирования износа слоя фрикционного материала дисков муфты сцепления, учитывающая изменение интенсивности изнашивания, и численная модель оценки ресурса агрегата с учетом периодичности технического обслуживания, позволяющие определить долговечность;

внедрены в образовательный процесс обучающихся по основной профессиональной образовательной программе бакалавриата 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» и по основной профессиональной образовательной программе магистратуры 23.04.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

Председатель
учебно-методической комиссии А.В. Зазыкин

Секретарь
учебно-методической комиссии Т.В. Виноградова

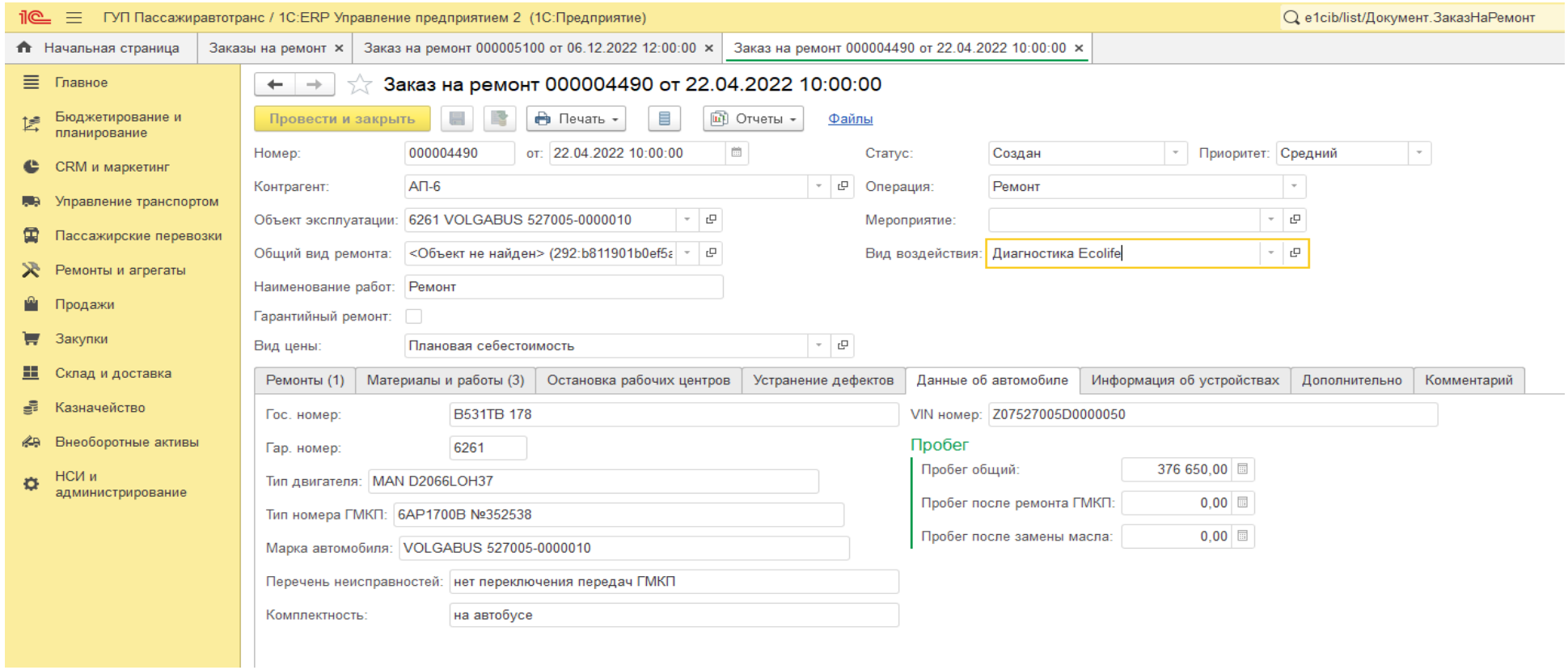
СОГЛАСОВАНО

Начальник УМУ Е.Б. Александрова

Начальник УНР М.В. Аверина

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Вид цифрового документа «Заказ на ремонт»



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Фрагмент статистики отказов ГМКП по подвижному составу ГУП ПАТ

	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
91	Дата	Номер заказ-наряда	Год	Марка и модель автобуса	Гаражный номер	Модель ГМКП	Наработка (Пробег)	Код классификатора неисправностей	Вид причины отказа (механическая или электрическая)	Причина неисправности	Вид последствия по классификатору отказов (Для ВР)
92	11.01.2022	3306	2022	LGABUS 6271-00000	7100	6АР1200В	414295	2108	М/Э	Неисправен селектор переключения режи	
93	11.01.2022	3310	2022	LGABUS 5270G-0000	7705	6АР1200В	310394	2102	М/Э	Неисправен электронно-гидравлический б	
94	11.01.2022	3311	2022	LGABUS 5270G-0000	7631	6АР1200В	442148	2108	М/Э	Неисправен электронный блок управлени	
95	11.01.2022	3313	2022	.GABUS 5270G2-000	7546	6АР1200В	395417	2108	М/Э	Неисправен электронный блок управлени	
98	14.01.2022	3343	2022	ЛиАЗ 52922	6838	6HP504C	287476	2108	М/Э	Неисправен электронный блок управлени	
99	19.01.2022	3347	2022	МАЗ 203085	8104	Т-325R	436149	2102	М/Э	Неисправен электронный блок управлени	
100	20.01.2022	3349	2022	LGABUS 5270-00000	6270	6АР1200В	404158	2109	М/Э	Неисправен импульсный датчик скорости	
101	25.01.2022	000003369	2022	НЕФАЗ 5299-30-32	6227	Д854.3Е	607489	2110	М	Износ и (или) разрушение резинотехничес	
120	17.02.2022	3426	2022	НЕФАЗ 5299-30-32	6275	Д854.3Е	631617	2110	М	Негерметичность соединений деталей кар	
129	01.03.2022	3449	2022	.GABUS 527005-0000	1531	6АР1700В	373838	2110	М	Износ и (или) разрушение резинотехничес	
133	02.03.2022	3468	2022	ЛиАЗ 529260	6246	6АР1400В	531902	2110	М	Негерметичность соединений деталей кар	
136	01.03.2022	3471	2022	.GABUS 527005-0000	6840	6АР1700В	443503	2110	М	Негерметичность соединений деталей кар	
144	05.03.2022	3489	2022	.GABUS 527005-0000	5332	6АР1700В	416981	2110	М	Негерметичность соединений деталей кар	
148	10.03.2022	3501	2022	LGABUS 6271-00000	6705	6АР1200В	224927	2110	М	Негерметичность соединений деталей кар	
150	15.03.2022	3504	2022	НЕФАЗ 5299-30-32	1265	Д854.3Е	491812	2110	М	Негерметичность соединений деталей кар	
151	15.03.2022	3505	2022	.GABUS 627105-0000	1566	6АР1700В	210264	2110	М	Износ и (или) разрушение резинотехничес	
192	26.04.2022	3605	2022	ЛиАЗ 529260	6876	6АР1400В	412993	2110	М	Ослабло крепление гидротрансформатор	
194	28.04.2022	3613	2022	ЛиАЗ 529260	6876	6АР1400В	412993	2110	М	Негерметичность соединений деталей кар	
197	29.04.2022	3624	2022	ЛиАЗ 529260	5535	6АР1400В	573953	2110	М	Ослабло крепление гидротрансформатор	
209	11.05.2022	000003639	2022	НЕФАЗ 5299-30-32	6275	Д854.3Е	907041	2110	М	Износ и (или) разрушение резинотехничес	
212	13.05.2022	3643	2022	МАЗ 103486	6257	Т-375R	328576	2110	М	Износ и (или) разрушение резинотехничес	
213	13.05.2022	3644	2022	ЛиАЗ 62132-0000010	7495	6HP504C	579938	2110	М	Ослабло крепление гидротрансформатор	
219	18.05.2022	3651	2022	ЛиАЗ 529260	6878	6АР1400В	615301	2110	М	Негерметичность соединений деталей кар	
224	20.05.2022	000003657	2022	НЕФАЗ 5299-30-32	6885	Д854.3Е	502969	2110	М	Износ и (или) разрушение резинотехничес	
234	03.06.2022	3689	2022	жанин 5270-000002	6230	6HP502C	605491	2110	М	Износ и (или) разрушение резинотехничес	
250	01.07.2022	3746	2022	ЛиАЗ 529260	5226	6АР1400В	929493	2110	М	Негерметичность соединений деталей кар	
255	05.07.2022	000003755	2022	НЕФАЗ 5299-30-32	6276	Д854.3Е	578821	2110	М	Износ и (или) разрушение резинотехничес	
283	04.08.2022	3821	2022	.GABUS 627105-0000	6856	6АР1700В	232259	2110	М	Износ и (или) разрушение резинотехничес	

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Матрица взаимосвязи признаков и причин отказов ГМКП

Признак отказов и его кодированный шифр															**Причина**
2101	2102	2103	2104	2105	2106	2107	2108	2109	2110	2111	2112	2113	2114	2115	
Посторонний шум и вибрации	Проскальзывание или пробуксовка передач	Заклинивание на одной из передач	Нет режима движения «R» - задний ход или «N» - нейтраль	Высокая температура смазочного материала (перегрев)	Некорректная работа гидрозамедлитель	Нестабильная работа ДВС при активации передачи	Нет движения после активации передачи	Разрегулировка в выборе передач	Течь смазочного материала	Течь охлаждающей жидкости	Состояние смазочного материала и охлаждающей жидкости (эмульсия)	Некорректная работа спидометра	Самопроизвольное вкл./выкл. передач	Некорректная работа селектора	
♦	♦	♦	♦	♦	♦		♦	♦							Низкий уровень СМ (объём меньше допустимого)
								♦	♦						Высокий уровень СМ (объём меньше допустимого)
	♦			♦	♦	♦		♦							Низкое главное давление СМ и (или) внутренние утечки
									♦	♦	♦				Негерметичность соединений деталей картера
				♦											Неисправность системы охлаждения
♦	♦		♦	♦			♦	♦							Износ фрикционов
♦		♦		♦											Износ подшипников качения
♦	♦	♦	♦				♦								Износ шлицевых и зубчатых соединений

Признак отказов и его кодированный шифр															**Причина**
2101	2102	2103	2104	2105	2106	2107	2108	2109	2110	2111	2112	2113	2114	2115	
Посторонний шум и вибрации	Проскальзывание или пробуксовка передач	Заклинивание на одной из передач	Нет режима движения «R» - задний ход или «N» - нейтраль	Высокая температура смазочного материала (перегрев)	Некорректная работа гидрозамедлитель	Нестабильная работа ДВС при активации передачи	Нет движения после активации передачи	Разрегулировка в выборе передач	Течь смазочного материала	Течь охлаждающей жидкости	Состояние смазочного материала и охлаждающей жидкости (эмульсия)	Некорректная работа спидометра	Самопроизвольное вкл./выкл. передач	Некорректная работа селектора	
♦		♦	♦	♦			♦	♦	♦						Износ втулок валов
♦															Износ обгонной муфты реактора гидротрансформатора
♦		♦	♦				♦	♦							Износ гидронасоса
♦	♦	♦	♦	♦			♦								Износ, разрушение и (или) заклинивание поршня фрикционной муфты
	♦			♦				♦							Износ или повреждение манжеты поршня фрикционной муфты
									♦	♦	♦				Износ и (или) разрушение резинотехнических изделий и материалов
♦	♦			♦				♦	♦						Ослабло крепление гидротрансформатора
♦							♦								Износ гидравлического демпфера
♦															Люфт карданного вала
		♦	♦				♦	♦							Повреждение (износ)/загрязнение каналов блока гидроклапанов

Признак отказов и его кодированный шифр															**Причина**
2101	2102	2103	2104	2105	2106	2107	2108	2109	2110	2111	2112	2113	2114	2115	
Посторонний шум и вибрации	Проскальзывание или пробуксовка передач	Заклинивание на одной из передач	Нет режима движения «R» - задний ход или «N» - нейтраль	Высокая температура смазочного материала (перегрев)	Некорректная работа гидрозамедлитель	Нестабильная работа ДВС при активации передачи	Нет движения после активации передачи	Разрегулировка в выборе передач	Течь смазочного материала	Течь охлаждающей жидкости	Состояние смазочного материала и охлаждающей жидкости (эмульсия)	Некорректная работа спидометра	Самопроизвольное вкл./выкл. передач	Некорректная работа селектора	
					♦										Разрушение корпуса гидрозамедлителя
											♦				Коррозионное разрушение картера
♦	♦	♦	♦	♦			♦	♦							Загрязнение или износ гидроклапанов
				♦											Загрязнение теплообменников и внутреннее состояние патрубков
	♦	♦			♦		♦	♦					♦	♦	Неисправен электронный блок управления и (или) разрыв электрической цепи CAN-линии
	♦		♦				♦	♦							Неисправен электронно-гидравлический блок управления соленоидами клапанов
♦	♦	♦	♦				♦								Неисправность или отказ соленоида гидроклапана
														♦	Неисправен датчик переключения селектора и (или) разрыв его электрической цепи
	♦	♦	♦				♦							♦	Неисправен селектор переключения режимов движения

Признак отказов и его кодированный шифр														**Причина**
2101	2102	2103	2104	2105	2106	2107	2108	2109	2110	2111	2112	2113	2114	2115	
Посторонний шум и вибрации	Проскальзывание или пробуксовка передач	Заклинивание на одной из передач	Нет режима движения «R» - задний ход или «N» - нейтраль	Высокая температура смазочного материала (перегрев)	Некорректная работа гидрозамедлитель	Нестабильная работа ДВС при активации передачи	Нет движения после активации передачи	Разрегулировка в выборе передач	Течь смазочного материала	Течь охлаждающей жидкости	Состояние смазочного материала и охлаждающей жидкости (эмульсия)	Некорректная работа спидометра	Самопроизвольное вкл./выкл. передач	Некорректная работа селектора	
					♦										Неисправен температурный датчик гидрозамедлителя и (или) разрыв его электрическкой цепи
	♦			♦				♦							Неисправен регулятор давления СМ
	♦							♦				♦			Неисправен импульсный датчик скорости
	♦				♦	♦	♦	♦					♦		Неисправен индукционный датчик турбины гидротрансформатора и (или) разрыв его электрическкой цепи и (или) требуется програмирование ЭБУ ДВС
								♦							Неисправен датчик положення дроссельной заслонки
								♦							Неисправен датчик пониженной передачи ("kick-down")
	♦														Неисправен датчик закрытия дверей
	♦														Неисправен датчик контроля положения кузова
	♦				♦										Неисправен датчик положения педали тормоза

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Методы испытаний и характеристики ФХ параметров СМ ГМКП

Параметр	Сущность метода испытаний
1. Состояние СМ	
Кинематическая вязкость при 100 ºС, мм^2/с	ASTM D445–06 Определяют время истечения определенного объема жидкости под воздействием силы тяжести через капилляр калиброванного вискозиметра при воспроизводимом напоре и строго контролируемой и известной температуре. Кинематическую вязкость находят как произведение измеренного времени истечения и постоянной калибровки вискозиметра. Необходимы два таких определения для получения среднего значения кинематической вязкости как результата ее определения
Кинематическая вязкость при 40 ºС, мм^2/с	
Индекс вязкости	ASTM D2270–10 Кинематическую вязкость при температуре 40 °С и 100 °С определяют стандартным методом испытания, а индекс вязкости рассчитывают по полученным данным испытаний с использованием известных корреляций.
Общее кислотное число, мгКОН/г	ASTM D664–18 Растворяют образец в растворителе для титрования и потенциометрически титруют спиртовым раствором гидроксида калия, используя стеклянный индикаторный электрод и электрод сравнения или комбинированный электрод. Показания измерительного прибора в зависимости от объема титрующего раствора наносят на калибровочный график вручную или автоматически. Конечными точками титрования на результирующем калибровочном графике считают только четко определяемые точки перегиба. При отсутствии четких перегибов конечные точки титрования определяют по показаниям измерительного прибора, соответствующим кислотным и щелочным водным буферным растворам
Температура застывания, °С	ГОСТ 20287–91 (метод Б) Сущность методов заключается в предварительном нагревании образца испытуемого нефтепродукта с последующим охлаждением его с заданной скоростью до температуры, при которой образец остается неподвижным. Указанную температуру принимают за температуру застывания. Наиболее низкую температуру, при которой наблюдается движение нефтепродуктов в условиях испытания, принимают за температуру текучести.
Температура вспышки в открытом тигле, °С	ASTM D92–18 Сущность метода заключается в нагревании пробы нефтепродукта в открытом тигле с установленной скоростью до тех пор, пока не произойдет вспышка паров (температура вспышки) нефтепродукта над его поверхностью от зажигательного устройства и пока при дальнейшем нагревании не произойдет загорание продукта (температура воспламенения) с продолжительностью горения не менее 5 сек.
Плотность при 15 °С, кг/м³	ASTM D4052–22 В осциллирующую трубку вводят небольшой объем жидкого образца, примерно от 1 до 2 см^3, измеряют частоту колебаний, вызванных изменением массы трубки, и с калибровочными данными используют для определения плотности, относительной плотности или плотности образца в градусах API – 15 °С (60 °F)
Коррозия медной пластинки, балл	ASTM D 130–10 Отшлифованную медную пластинку погружают в испытуемый образец, нагреваемый при температуре и в течение времени, установленных для данного класса материала. После нагревания медную пластинку вынимают, промывают и определяют ее цвет и степень тусклости сравнением с эталоном ASTM по определению коррозии медной полоски.

Параметр	Сущность метода испытаний
2. Химический состав СМ	
Содержание воды (КФ), %	ASTM D6304–07 В кулонометрическом методе Карла Фишера воду из образца испаряют путем нагревания до температуры выше 100 °C. Пар направляется в сосуд для титрования, используя полые иглы и азот. Здесь происходит электрохимическая реакция между водой и раствором KF. Как только точка перехода кривой титрования будет достигнута, можно указать точное содержание воды.
Содержание твердых осадков, % масс	ASTM D473–22 Сущность метода заключается в определение твердого осадка в испытуемых нефтепродуктах или нефти путем экстракции толуолом. Положения прецизионности данного метода применимы к диапазону содержания твердых осадков от 0,01 % до 0,40 % по массе, хотя могут быть определены и более высокие уровни.
Содержание серы (массовая доля серы), % масс	ASTM D 4294–10 Испытуемый образец помещают в пучок лучей, испускаемых рентгеновской трубкой. Измеряют результирующее возбужденное характеристическое рентгеновское излучение и для получения значения общего содержания серы в процентах по массе или миллиграммах на килограмм сравнивают полученный сигнал счетчика импульсов с сигналами, полученными при испытании заранее приготовленных калибровочных образцов, которые охватывают исследуемый диапазон концентраций: 0,0 % масс. – 0,1 % масс.; 0,1 % масс. – 1,0% масс.; 1,0 % масс. – 5,0% масс.
Элементная спектрометрия (21 химический элемент), мг/кг	ASTM D 5185–18 Определение химических элементов: присадок, изнашиваемых металлов и загрязняющих веществ в отработанных и неиспользованных СМ и базовых СМ методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (разновидность эмиссионной спектрометрии, которая использует индуктивно связанную плазму для получения возбужденных атомов и ионов, которые испускают электромагнитное излучение на длинах волн, характерных для конкретного элемента. Плазма представляет собой высокотемпературный источник ионизированного исходного газа. Плазма поддерживается индуктивной связью электрических катушек на мегагерцовых частотах. Интенсивность излучения различных длин волн света пропорциональна концентрации элементов в образце).
ИК-спектроскопия Фурье, поглощение, А, и волновое число, $см^{-1}$	ASTM E2412–23 Метод спектроскопии Фурье основан на использовании различных молекул в СМ, которые из-за своих типичных химических структур поглощают инфракрасный свет в разной степени с определенными длинами волн. Изменения в используемом СМ можно сравнить с эталонным спектром свежего СМ и изобразить, рассчитать и интерпретировать в виде типичных диапазонов для определенных «волновых чисел». Метод предназначен для спектроскопической проверки состояния и соответствия базовых компонентов смазочных материалов в эталонном образце и в образце после эксплуатации, а также для определения общего состояния оборудования в процессе эксплуатации, путем мониторинга измерений протекающих в смазочных материалах, наблюдаемых в инфракрасном спектре, а именно: содержание воды, сажи, этиленгликоля, топлива и процессов окисление, нитрование и сульфирование.

Приложение В.2 – Характеристики основных ФХ параметров СМ ГМКП

Параметр	Характеристика
Кинематическая вязкость при 100 ºС, мм^2/с	Вязкость является мерой жидкостного сопротивления потоку и характеризуется текучестью СМ при заданной температуре. Снижение вязкости может быть связано с разжижения СМ. Увеличение вязкости может быть связано с перегревом СМ или попаданием охлаждающей жидкости (гликоля) в СМ.
Кинематическая вязкость при 40 ºС, мм^2/с	
Индекс вязкости	Эмпирический безразмерный показатель, который оценивает зависимость вязкости жидкости от температуры. Чем выше значение данного показателя, тем меньше зависимость вязкости жидкости от температуры, а значит лучше вязкостно-температурные свойств. С повешением числа индекса вязкости наклон кривой более пологий.
Кислотное число (мгКОН/г)	В трансмиссионном СМ содержатся кислотные компоненты, содержание которых определяется как в новом, так и работающем СМ. Кислотные компоненты нового СМ имеют особую кислотность, которая не оказывает значительного воздействия на коррозию металлов. Данный показатель выражается через количество гидроокиси калия (мгКОН), необходимого для нейтрализации слабых кислот в 1 г СМ. В работающих СМх ГМКП он характеризует образование кислот при окислении СМ, значение данного показателя увеличивается
Температура застывания, °С	Температура потери текучести СМ при самых низких температурных пределах, но при которых СМ еще обладает способностью течь и прокачиваться в каналах системы смазки агрегата. Показатель должен быть на ± 5 °С выше действительной температуры затвердевания, при которой СМ полностью теряет способность течь и прокачиваться
Температура вспышки в открытом тигле, °С	Наименьшая температура, при которой пары летучего вещества над его поверхностью вспыхивают в воздухе под воздействием источника зажигания. Характеризует огнеопасность СМ, дает представление о характере углеводородов в нем, позволяет оценить степень разжижения СМ и узнать о наличии примесей легкоиспаряемых компонентов
Плотность 15 °С, кг/м³	Плотность влияет на количество циркулирующей жидкости в системе и напряжённость работы насоса, создающего давление жидкости в системе. С понижением плотности увеличивается риск интенсивного пенообразования, но стабильность пены уменьшается и наоборот, однако комплекс присадок может увеличить склонность к пенообразованию.
Содержание воды (метод Фишера), %	Наличие воды выше допустимой нормы в трансмиссионном СМ может привести к потенциальным проблемам (появление осадка, коррозия, быстрое окисление СМ, гидролиз элементов присадок), что приведет к интенсивному коррозионно-механическому изнашиванию и задирам пар трения. Также наличие воды выше нормы усилит риск пенообразования.
Массовая доля механических примесей, % масс	Показатель дает количественную оценку, показывает чистоту СМ по наличию в нём твердых частиц, которые вызывают износ деталей и участвуют в образовании отложений и шлама. Механические примеси удерживаются фильтром, однако частицы размером менее 25–40 мкм накапливаются в СМ и участвуют в процессе износа

Параметр	Характеристика
Массовая доля серы, %	Количество серы, содержащейся в СМ Содержание серы частично говорит о природе нефти, из которого изготовили базовое СМ с определенной степенью частоты, и разновидности примененного пакета присадок, из которых произведено СМ Типично для СМ с присадками на салицилатах кальция (эффективный детергент), содержащих 0,2–0,26 % серы, (присадки на сульфонатах кальция содержат около 0,4 % серы). По высокому содержанию серы 0,5–0,6 % и выше можно предположить, что в СМ есть минеральное СМ первой группы (такое содержание серы характерно для полусинтетических СМ).
Коррозия медной пластинки, балл	Коррозия цветных металлов, применяемых в деталях ГМКП оценивается на пластинках при выдерживании их в течение установленного времени в горячем СМ с последующей визуальной оценкой повреждения поверхности и изменения цвета или структуры поверхности.
Элементная спектрометрия (21 химический элемент: Al, Ba, B, Ca, Cr, Cu, Fe, Pb, Mg, Mn, Mo, Ni, K, P, Na, Si, Ag, Sn, Ti, V, Zn), мг/кг	Анализ фокусируется на исследовании очень мелких частиц (< 5 мкм), определяя фактическое количественное наличие элементов присадок, частиц износа металлов и загрязняющих веществ при эксплуатации ГМКП.
Инфракрасная спектроскопия Фурье (поглощение), $см^{-1}$	Анализ основан на воздействии инфракрасного света на различные молекулы СМ, которые из-за своих типичных химических структур поглощают инфракрасный свет в разной степени и с определенными длинами волн. Метод позволяет оценить степень истощения работающего СМ. Проводится сравнительный мониторинг полученных спектров с эталонным спектром нового СМ для интерпретации степени изменения функциональных компонентов.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Фрагменты спецификаций СМ для ГМКП

(Allison, Voith, ZF)

Operator's Manual | 2023 SEPTEMBER | OM8491EN

Allison Transmission

Allison 5th Generation Controls
Allison 6th Generation Controls

3000 Series™ and 4000 Series™

3000	3500 EVS	4200 ORS	4700 ORS	T 270
3000 EVS	3500 OFS	4430 OFS	4700 RDS	T 280
3000 HS	3500 ORS	4430 ORS	4700 SP	T 310
3000 MH	3500 RDS	4430 SP	4750 OFS	T 325
3000 ORS	3500 SP	4500	4800	T 350
3000 PTS	3700	4500 EVS	4800 EVS	T 375
3000 RDS	3700 SP	4500 HS	4800 ORS	T 390
3000 SP	4000	4500 OFS	4800 SP	T 425
3000 TRV	4000 EVS	4500 ORS	4850 EVS	T 450
3200	4000 HS	4500 RDS	B 295	T 525
3200 MH	4000 MH	4500 SP	B 300	T3280 xFE™
3200 ORS	4000 ORS	4600 ORS	B 400	T3325 xFE™
3200 SP	4000 RDS	4700	B 500	T3375 xFE™
3200 TRV	4000 SP	4700 EVS	B3400 xFE™	
3500	4000 TRV	4700 OFS	T 260	

Allison Transmission
Allison Transmission, Inc.
P.O. Box 894 Indianapolis, Indiana 46206-0894
allisontransmission.com

Table 5–6. Recommended Filter Change/Fluid Change Intervals

3000/4000 Series Fluid And Filter Change Interval Recommendations					
		Prognostics Turned Off or Not Calibrated in TCM		Prognostics Turned On	
	Duty Cycle	Allison Approved TES 668™ and/or TES 295® Fluid	Allison Approved TES 389® Fluid	Allison Approved TES 668™ and/or TES 295® Fluid	Allison Approved TES 389® Fluid
Fluid	General*	300,000 Miles (480,000 km) 6,000 Hours 48 Months	25,000 Miles (40,000 km) 1,000 Hours 12 Months	When indicated by controller or 60 months, whichever occurs first	When indicated by controller or 24 months, whichever occurs first
	Severe**	150,000 Miles (240,000 km) 6,000 Hours 48 Months	12,000 Miles (20,000 km) 500 Hours 6 Months		
* General Vocation: All vocations not classified as Severe ** Severe Vocation: On/Off Highway, Refuse, City Transit, Shuttle Transit					
Main Filter	General*	75,000 Miles (120,000 km) 3,000 Hours 36 Months	25,000 Miles (40,000 km) 1,000 Hours 12 Months	When indicated by controller or 60 months, whichever occurs first	When indicated by controller or 24 months, whichever occurs first
	Severe**	75,000 Miles (120,000 km) 3,000 Hours 36 Months	12,000 Miles (20,000 km) 500 Hours 6 Months		
Internal Filter	All	Overhaul	Overhaul	Overhaul	Overhaul

www.allisontransmission.com — On-Highway Fluids

SALES + SERVICE LOCATOR SUPPLIERS MERCHANDISE CONTACT MY ALLISON SEARCH

Allison Transmission

TRANSMISSIONS EV SOLUTIONS WHY ALLISON PARTS + SERVICE COMPANY CAREERS AT ALLISON

Allison Transmission >> Parts + Service >> Approved Fluids >> On-Highway Fluids

On-Highway Fluids

Allison Transmission TES 295® Approved Fluids are approved for use in Allison 1000 Series™, 2000 Series™, 3000 Series™, 4000 Series™ and H 40/50 EP™ on-highway products.

Allison recommends that customers using TES 295® Approved Fluid consider Allison's newest fluid spec, TES 668®, for their next service.

To purchase an Allison approved fluid, use the Sales + Service Locator to find an Allison Authorized Distributor in your area.

TES 668® | TES 295® | TES 468™ | TES 389™

Castrol TranSynd™ App Num: AN-011001

bp Autran Syn 295™ App Num: AN-031002

BASF Emgard 2805™ App Num: AN-031003

Fleetrite Synthetic ATF™ App Num: AN-031004

Mobil Delvac Mobil Delvac Synthetic ATF™ / Mobil Delvac 1 ATF™ App Num: AN-051005

Shell Spirax S6 ATF A295™ App Num: AN-121008

VOITH

DIWA
List of Approved Oils
Oil Change Interval 60,000 km

2023-01-17
H55.633551en, Protection class 0: open

This list of approved oils is not applicable to North America
→ VTI-DIWA Service Bulletins 013 and 118

This list of approved oils is not applicable to Latin America
→ DIWA Service Bulletin LAT013

List of Approved Oils H55.633551en
Printed/created on: open (2023-01-17)

Producer/Oil supplier	Product name
Petrobras Distribuidora S.A.	Lubrax ATF TDX
Petro-Canada Lubricants	Petro-Canada DEXRON VI ATF
Petrogal S.A.	GALP Transmatic D II
	GALP Transmatic D III
Petronas Lubricants International	PETRONAS TUTELA ATF 500 HD
	PETRONAS TUTELA STARFLUID HD-ED
Phillips 66 Company	Meroon V ATF (M5091001)
	VersaTrans ATF (M5091007)
Phillips 66 Company (Kendall)	Meroon V ATF (M5091001)
	VersaTrans ATF (M5091007)
PRIMAX COLOMBIA S.A.	MAXTER TRANSMISIONES ATF HD
Prista Oil Holding EAD	Prista ATF II M
	Prista ATF III
PT. Pertamina Lubricants	Pertamina ATF
Rafinerija nafte a.d. Beograd	GALAX ATF III
	Galaxmatic Dac
Repsol Lubricantes y Especialidades S.A.	REPSOL MATIC ATF
RN-Lubricants LLC	Rosneft Kinetic ATF II D
	Rosneft Kinetic ATF III
ROLF Lubricants GmbH	ROLF ATF IID
	ROLF ATF IIIG
ROWE Mineralölwerk GmbH	ROWE HIGHTEC ATF 8000

Commercial Vehicle Technology

Автоматическая коробка передач тип EcoLife для автобусов и грузовых автомобилей

Перечень смазочных материалов TE-ML 20

{Содержание} **Страница**

1. Классификация транспортных средств 1
2. Разрешенные категории смазочных материалов для АКПП EcoLife 1
3. Интервалы замены масла и фильтров 2
3.1 Интервалы замены масла и фильтров для городских автобусов, а также ближнемагистральных и дальнемагистральных грузовых автомобилей (модификации EcoLife с обозначением B, BS, T, TK, TP, TKP): 2
3.2 Интервалы замены масла и фильтров для туристических автобусов. Тип АКПП Coachline (4): 3
3.3 Интервалы замены масла и фильтров для туристических автобусов. Тип АКПП Coach (6AP2300BC): 4
4. Разъяснение сносок и примечаний 4
5. Классификация смазочных материалов и разрешенная продукция в розничной торговле 5

1. Классификация транспортных средств

АКПП EcoLife- эксплуатируются под различными нагрузками с различной температурой масла. Разрешения на применение масел, а также интервалы замены определяются в зависимости от характеристик транспортного средства. Классификацию к разделу TE-ML 20.100, 20.105 или. 20.110 Вы можете прочитать в руководстве по эксплуатации Вашего автомобиля.

2. Разрешенные категории смазочных материалов для АКПП EcoLife

Класс продукции	Классификация транспортных средств в соответствии с руководством по эксплуатации	Классификация смазочных материалов для заправки при обслуживании (1)
EcoLife для городских автобусов EcoLife: 6AP1000B, 6AP1000BS, 6AP1200B, 6AP1200BS, 6AP1400B, 6AP1400BS, 6AP1600BS, 6AP1620B, 6AP1700B, 6AP2000B и соответствующие модификации с угловым редуктором EcoLife2: 6AP1020B, 6AP1220B, 6AP1420B, 6AP1620B, 6AP1720B, 6AP2020B	TE-ML 20.100	20B / 20C / 20F / 20G
	TE-ML 20.105	20B / 20C / 20F / 20G
EcoLife для туристических автобуосов EcoLife Coach: 6AP2300BC EcoLife2 Coachline: 6AP1220C, 6AP1420C, 6AP1620C, 6AP1720C, 6AP2020C, 6AP2320C, 6AP2520C, 6AP2820C	TE-ML 20.110	20F / 20G
EcoLife для грузовых автомомбилей (3) Все модификации EcoLife с оконечным обозначением T, TK, TP, TKP		

Перечень смазочных материалов TE-ML 20, **издание 01.01.2023** отменяет все предыдущие издания. Действительный в данный момент перечень можно запросить в каждом сервисном пункте фирмы ZF и в интернете по адресу www.aftermarket.zf.com/ru/lubricants.	**ZF Friedrichshafen AG** D-88038 Friedrichshafen www.zf.com/contact

3. Интервалы замены масла и фильтров

3.1 Интервалы замены масла и фильтров для городских автобусов, а также ближнемагистральных и дальнемагистральных грузовых автомобилей (модификации EcoLife с обозначением B, BS, T, TK, TP, TKP):

Таблица 1: Классификация транспортных средств TE-ML 20.100 (Температура в поддоне картера АКПП до 100°C)

Класс смазочного материала (1)	Интервал замены масла и маслонапорного фильтра [км/год] (2)
20B	60.000 км 1 x в год
20C	120.000 км 1 x в 2 года
20F / 20G	240.000 км 1 x в 4 года

Таблица 2: Классификация транспортных средств TE-ML 20.105 (Температура в поддоне картера АКПП до 105°C)

Класс смазочного материала (1)	Интервал замены масла и маслонапорного фильтра [км/год] (2)
20B	60.000 км 1 x в год
20C	120.000 км 1 x в 2 года
20F / 20G	180.000 км 1 x в 3 года

Таблица 3: Классификация транспортных средств TE-ML 20.110 (Температура в поддоне картера АКПП до 110°C)

Класс смазочного материала (1)	Интервал замены масла и маслонапорного фильтра [км/год] (2)
20F / 20G	120.000 km 1 x в 3 года

Класс смазочных материалов 20F

Изготовитель (20F)	Обозначение продукта (20F)	Номер одобрения ZF
PETRONAS LUBRICANTS INTERNATIONAL SDN BH, KUALA LUMPUR/MY SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMP., LTD, LONDON/GB ZF FRIEDRICHSHAFEN AG, FRIEDRICHSHAFEN/DE	TUTELA TRANSMISSION ATF 120 SHELL SPIRAX S6 ATF ZM ZF ECOFLUID A LIFE	ZF000053 ZF001483 ZF001671

Класс смазочных материалов 20G

Изготовитель (20G)	Обозначение продукта (20G)	Номер одобрения ZF
ZF FRIEDRICHSHAFEN AG, FRIEDRICHSHAFEN/DE	ZF ECOFLUID A LIFE	ZF001719

Commercial Vehicle Technology

Переключаемые под нагрузкой автоматические коробки передач, тип Ecomat [1], для автобусов, грузовых автомобилей и автомобилей специального назначения

Перечень смазочных материалов TE-ML 14

Содержание **Страница**

1. Разрешенные к использованию классы смазочных материалов ... 1
Таблица 1: Интервалы замены масла и фильтров коробок передач Ecomat для автобусов ... 2
Таблица 2: Интервалы замены масла и фильтров коробок передач Ecomat для грузовиков, строительных машин и автомобилей специального назначения ... 2
2. Объяснение сносок и примечаний ... 3
3. Классы смазочных материалов и разрешенные к использованию торговые продукты ... 4

1. Разрешенные к использованию классы смазочных материалов

Группы продукции	Классы смазочных материалов для сервисной заправки
Ecomat (Температура масляного поддона до 100°C) [3] HP500, HP590, HP600 HP502C, HP552C, HP592C, HP602C, HP504C, HP554C, HP594C, HP604C **Ecomat HL (Температура масляного поддона до 100°C) [3]** HP900, HP902	**14A / 14B / 14C / 14E** **масло для автоматических коробок передач (ATF)** Разрешенные торговые продукты и интервалы замены масла смотрите следующие страницы **особо рекомендуется:** **ZF-Ecofluid A Life (14E) [2]**
Ecomat (Температура масляного поддона до 105°C) [4] HP502C, HP552C, HP592C, HP602C, HP504C, HP554C, HP594C, HP604C **Ecomat HL (Температура масляного поддона до 105°C) [4]** HP900, HP902	**14E** **особо рекомендуется:** **ZF-Ecofluid A Life (14E) [2]**

Перечень смазочных материалов TE-ML 14, **издание 01.01.2023** отменяет все предыдущие издания. Действительный в данный момент перечень можно запросить в каждом сервисном пункте фирмы ZF и в интернете по адресу www.aftermarket.zf.com/ru/lubricants.	**ZF Friedrichshafen AG** D-88038 Friedrichshafen www.zf.com/contact

Таблица 1: Интервалы замены масла и фильтров коробок передач Ecomat для автобусов

Классы смазочных материалов (разрешенные торговые продукты смотрите следующие страницы)	Интервалы замены масла и фильтров [км/лет] [5]
14A	30.000 км 1 раз в год
14B	60.000 км 1 раз каждые 2 года
14C	120.000 км 1 раз каждые 2 года
14E	150.000 км 1 раз каждые 3 года

Указание:
При первой смене масла с ATF классов смазочных материалов 14A или 14B на ATF с более долгими интервалами замены масла требуется промежуточная замена масла после < 60.000 км/макс. 2 года.

Таблица 2: Интервалы замены масла и фильтров коробок передач Ecomat для грузовиков, строительных машин и автомобилей специального назначения

Классы смазочных материалов (разрешенные торговые продукты смотрите следующие страницы)	Интервалы замены масла и фильтров [ч/лет]	
	нормальные условия эксплуатации [6], [7], [9]	**тяжелые условия эксплуатации [6], [8], [9]**
14A	400 ч 1 раз в год	300 ч 1 раз в год
14B	750 ч 1 раз в год	500 ч 1 раз в год
14C	1500 ч 1 раз в год	1000 ч 1 раз в год
14E	2000 ч 1 раз каждые 2 года	1500 ч 1 раз в год

Указание:
При первой смене масла с ATF классов смазочных материалов 14A или 14B на ATF с более долгими интервалами замены масла требуется промежуточная замена масла после < 750 ч/макс. 1 год.

Класс смазочных материалов 14E

Изготовитель (14E)	Обозначение продукта (14E)	Номер одобрения ZF
PETRONAS LUBRICANTS INTERNATIONAL SDN BH, KUALA LUMPUR/MY	TUTELA TRANSMISSION ATF 120	ZF000053
SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMP. LTD, LONDON/GB	SHELL SPIRAX S6 ATF ZM	ZF001483
ZF FRIEDRICHSHAFEN AG, FRIEDRICHSHAFEN/DE	ZF ECOFLUID A LIFE	ZF001671

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Лабораторный отчет и акт отбора применяемых СМ

РЕЗУЛЬТАТЫ

Заказ		1	2	3	4
Тип масла		Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF A295	Rosneft Kinetik ATF III	ZF-Ecofluid A Life
Образец		31207121	31704703	31704270	**31707506**
Отбор/Замена масла		Отбор	Отбор	Отбор	**Отбор**
Дата отбора		06/10/2023	30/11/2023	17/10/2023	**08/04/2024**
Дата получения		19/10/2023	06/12/2023	20/11/2023	**27/04/2024**
Дата выдачи заключения		23/10/2023	08/12/2023	21/11/2023	**30/04/2024**
Срок службы масла (км)		0	0	0	**0**
Долив масла (л)		0	0	0	**0**
Индикаторы износа					
Алюминий (Al)	ASTM D5185–18	0	0	0	0
Железо (Fe)	ASTM D5185–18	0	0	0	0
Хром	ASTM D5185–18	0	0	0	0
Медь (Cu)	ASTM D5185–18	0	0	0	0
Свинец	ASTM D5185–18	0	0	0	0
Олово	ASTM D5185–18	0	0	0	0
Серебро ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0
Никель ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0
Содержание осадка %m	ASTM D473–22	0.000	0.000	0.000	0.000
Температура застывания, °C	ГОСТ 20287–91 Б	-56	-60	-53	-57
Марганец ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0
Загрязнение					
Содержание воды %	ASTM D6304–07	0.014	0.084	0.023	0.026
Калий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0
Натрий (Na)	ASTM D5185–18	0	0	0	0
Титан ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0
Ванадий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0
Содержание серы (S),%m	ASTM D4294–10	0.082	0.294	0.061	0.086
Состояние масла					
Температура вспышки в открытом тигле, °C	ASTM D92–18	232	226	212	238
Вязкость при 40°C cSt	ASTM D445–06	56.46	36.01	40.50	55.86
Вязкость при 100°C cSt	ASTM D445–06	10.12	7.22	7.97	10.24
Индекс вязкости	ASTM D2270–10	169	170	172	174
Общее кислотное число мгKOH/г	ASTM D664–18	0.74	2.47	0.56	0.75
Коррозия медной пластинки	ASTM D130–10	1a	1a	1a	1a
Плотность при 15°C kg/m³	ASTM D4052-22	838.5	861.2	869.8	842.0
Присадки					
Фосфор (P)	ASTM D5185–18	300	544	324	206
Цинк (Zn)	ASTM D5185–18	20	3	263	2
Кальций (Ca)	ASTM D5185–18	120	188	30	61
Барий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0
Магний ppm	ASTM D5185–18	5	0	0	0
Молибден ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0
Бор (B)	ASTM D5185–18	110	255	78	99
Кремний (Si)	ASTM D5185–18	21	0	15	0

Ведущий инженер /_____/ А.Л.Погорелова

Акционерное общество ОГРН 1027739372182 "СЖС Восток Лимитед" Испытательный центр SGS 1 "SGS Vostok Limited" * МОСКВА *

Санкт-Петербургское
государственное унитарное предприятие
пассажирского автомобильного транспорта
(СПб ГУП «Пассажиравтотранс»)

СВОДНЫЙ АКТ
ОТБОРА ПРОБ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

№ НП-01 15.04.2022

Комиссия в составе:

Попов А.Б. – Начальник Производственно-технический отдела Автобусного парк №2 – филиал СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

Степанишин Р.А. – Инженер Производственно-технический отдела Автобусного парк №2 – филиал СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

Журавлев А.Н. – Начальник Централизованного участока по ремонту и техническому обслуживанию ГМКП Автобусного парк №6 – филиал СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

произвела отбор пробы технической жидкости в соответствии с требованиями ГОСТ 2517-2012 для проведения анализа используемых смазочных материалов ГМКП на предприятии, согласно приведенному перечню:

Дата отбора	Время отбора	Номер пломбы	Наименование тех. жид.	Место отбора пробы (емкость, резервуар, агрегат ТС и др.)	Наработка, (км)	Кол-во отобранного образца, (мл)	Наименование поставщика
1	2	3	4	5	6	7	8
06.10.2023	7:55:00 AM	13046206	Shell Spirax S6 ATF ZM	Тара	0	565	ООО "АЗИМУТ" (Договор №ДО/ГСМ-208 от 04.08.2022)
17.10.2023	8:35:00 AM	13046206	Rosneft Kinetik ATF III	Тара	0	565	ООО "ТД Тенеф" (Договор №ДО/ГСМ-206 от 28.06.2022)
30.11.2023	11:45:00 AM	13046206	Shell Spirax S6 ATF A295	Тара	0	565	ООО "ТД АВТОСПА" (Договор №ДО/ГСМ-176 от 06.10.2022)
08.04.2024	9:35:00 AM	13046206	ZF-Ecofluid A Life	Тара	0	565	ООО "УРЦ ТЕРМЕЗ" (Счёт №ЦФ000190 от 18.03.2024)

Ответственный за отбор и транспортировку проб:

Орехов В.В. – Главный специалист Управления промышленной безопасности и охраны труда СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

Подписи членов комиссии/присутствующих лиц:

Попов Алексей Борисович _____
(Ф.И.О., подпись)

Степанишин Роман Алексеевич _____
(Ф.И.О., подпись)

Журавлев Алексей Николаевич _____
(Ф.И.О., подпись)

ПРИЛОЖЕНИЕ И

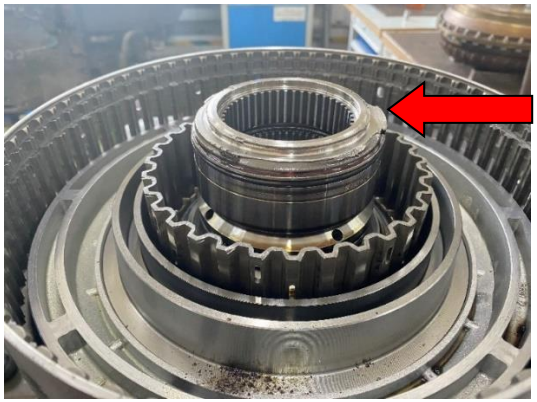
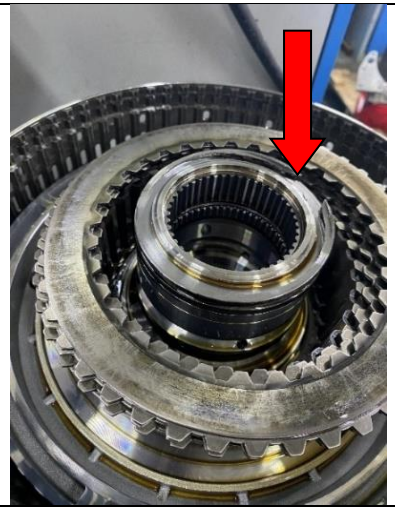
Группы основных базовых СМ

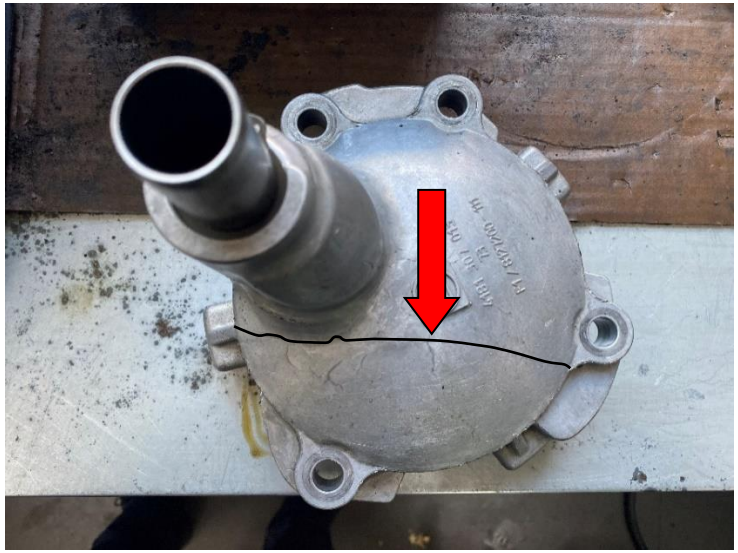
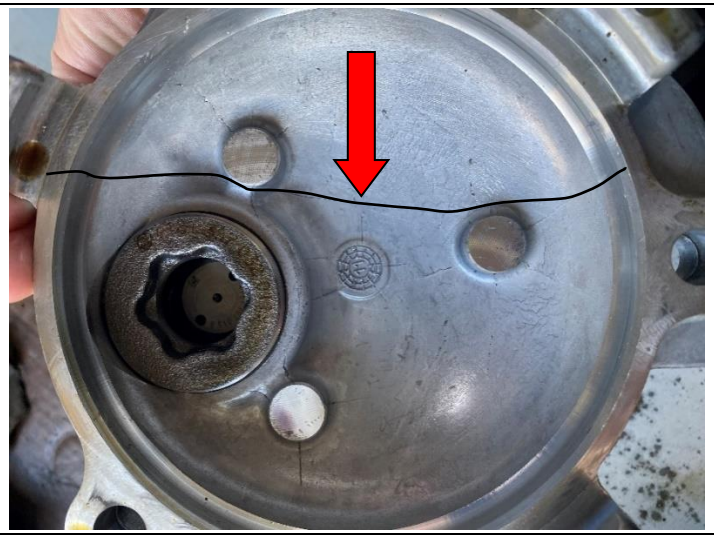
Сырьё для производства	Вид СМ	Группа базового СМ	Процесс получения	Индекс вязкости	Содержание предельных углеводородов, %	Содержание серы, %	Свойства															
							Смазывающие	Текучесть	Низкотемпературные	Термостойкость	Термоокислительная стойкость	Стойкость к окислению	Полярность молекул	Прочность плёнки на разрушение	Смешиваемость	Растворимость присадок	Гидролитическая стойкость	Стойкость к гигроскопичности	Антикоррозионость	Стойкость к испаряемости	Огнестойкость	ИТОГО
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Нефть	Минеральные СМ	Базовое СМ I группы	Традиционный (селективная очистка)	80-95	<90	>0,03	3	2	2	3	3	2	4	3	6	6	6	5	6	5	2	58
		Базовое СМ II группы	Депарафинизация, гидроочистка	100-120	≥90	≤0,03	3	3	2	3	3	2	4	4	6	6	6	5	6	5	2	60
	Гидрокрекин	Базовое СМ III группы	Глубокая гидроочистка, гидроизомеризация	≥130	≥90	≤0,03	4	4	3	3	4	3	4	4	6	6	6	5	6	5	2	65
Нефтяной газ (этилен или	Синтетические СМ	Полиальфаолефиновое СМ (PAO) базовое СМ IV группы	Синтез – полимеризация олефинов	≥150	≥90	0,00	4	4	4	3	5	4	2	5	6	3	6	6	6	2	2	62
Растительные СМ (рапсов		Сложные эфиры (эстеры) базовое СМ V группы	Синтез – высших жирных карбоновых кислот с глицирином (прямая этерификация)	от 150 до 180	-	-	5	5	4	4	4	5	6	6	4	3	2	2	3	2	3	58
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Нефтяной или природный газ	Синтетические СМ	Полиалкиленгликольевое СМ (PAG) базовое СМ V группы	Синтез – путем анионной олигомеризации окисей низших олефинов	от 180 до 250	-	-	6	5	5	6	6	5	6	6	2	2	6	6	4	4	4	73

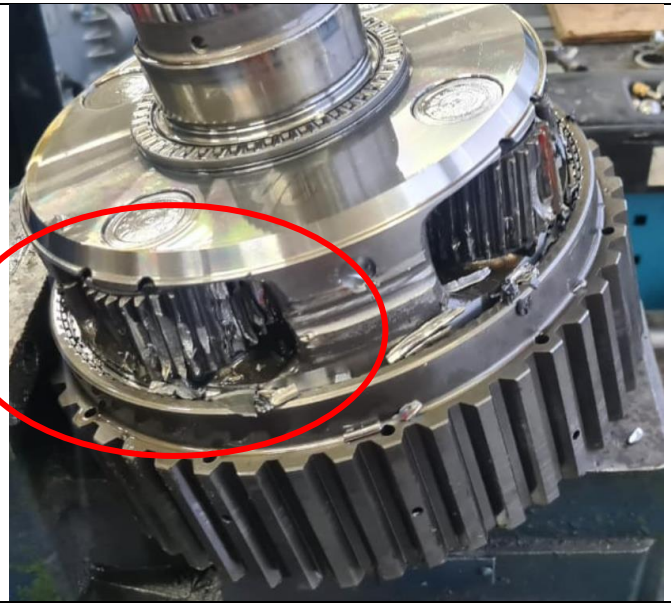
Примечание: оценка свойств в баллах: 6 - превосходные, 5 - отличные, 4 - хорошие, 3 - удовлетворительные, 2 - плохие.

ПРИЛОЖЕНИЕ К

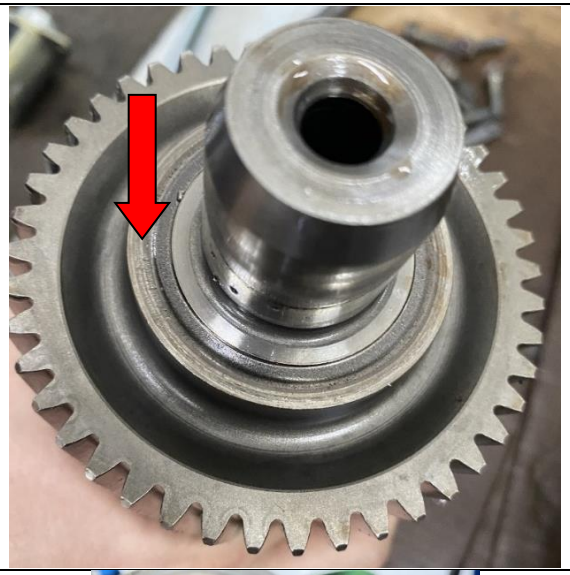
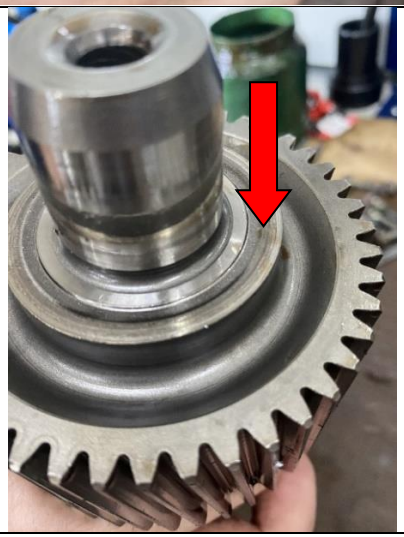
Анализ дефектов – механических причин полных отказов ГМКП городского автобуса

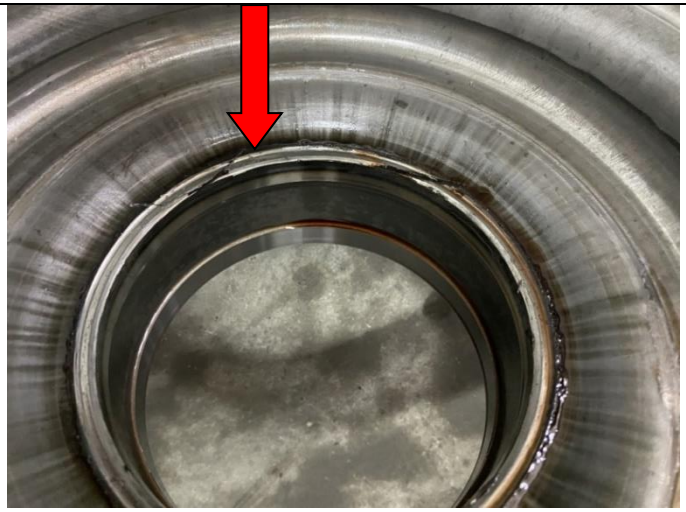
Дефектное состояние	Исправное состояние
1. Механическое разрушение	
1.1. Разрушение кромки ступицы фрикционных муфт «А» и «В»	
	
	

Дефектное состояние	Исправное состояние
1.2. Трещина крышки корпуса гидроаккумулятора	
	
	

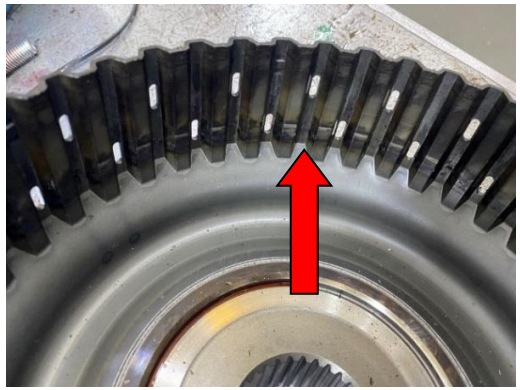
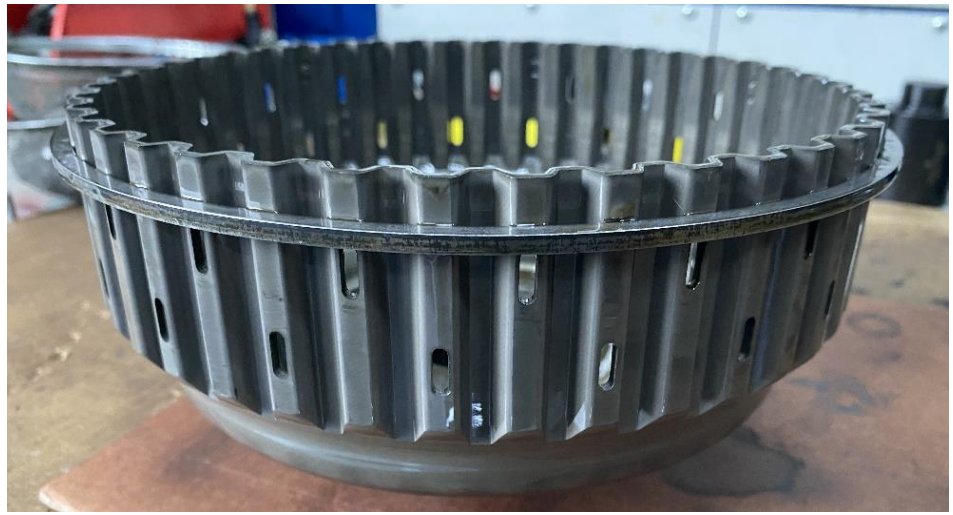
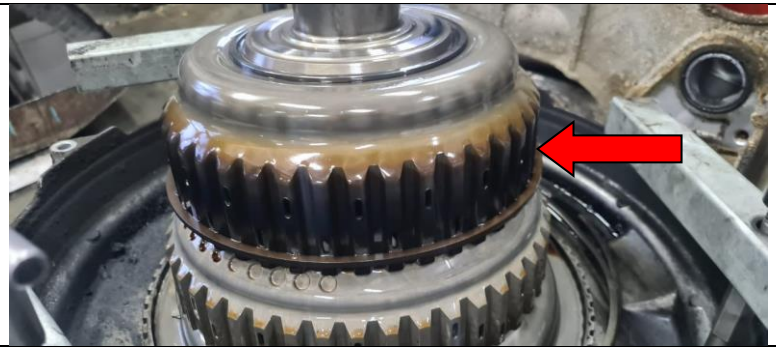
Дефектное состояние	Исправное состояние
1.3. Разрушение зубьев планетарной передачи	
	
	

Дефектное состояние	Исправное состояние
1.4. Разрушение подшипника планетарной передачи	
	
	

Дефектное состояние	Исправное состояние
2. Механический износ	
2.1. Износ поверхности выходного (приводного) вала	
	
	

Дефектное состояние	Исправное состояние
2.2. Износ внутренней кромки полого вала ступицы фрикционных муфт «А» и «В»	
	
	

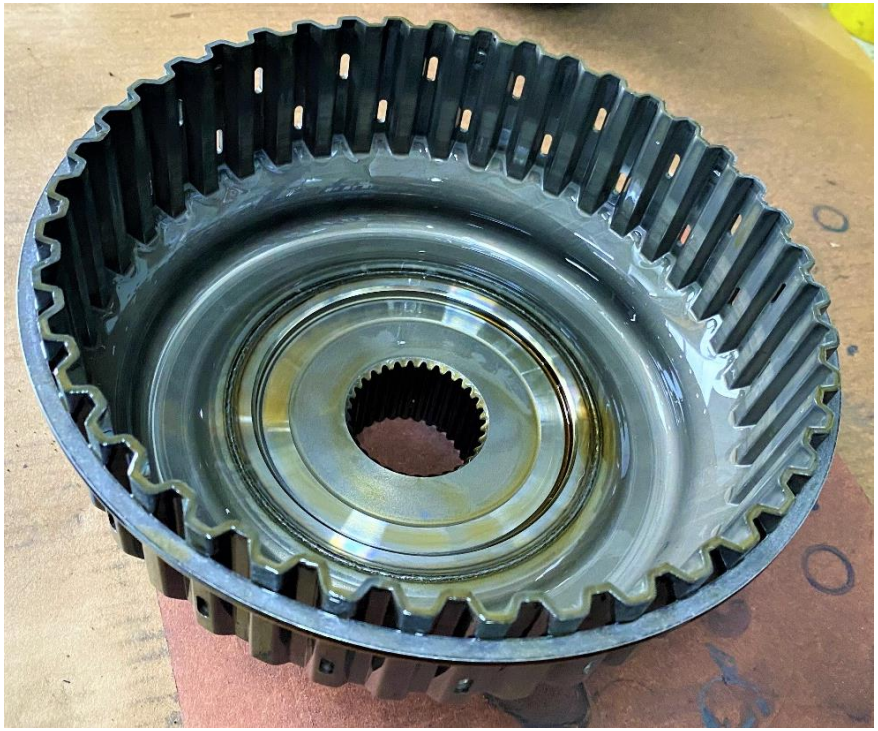
Дефектное состояние	Исправное состояние
3. Температурные деформации в следствии перегрева	
3.1. Локальный перегрев поршня фрикционной муфты «А» и «В»	
	
	
	

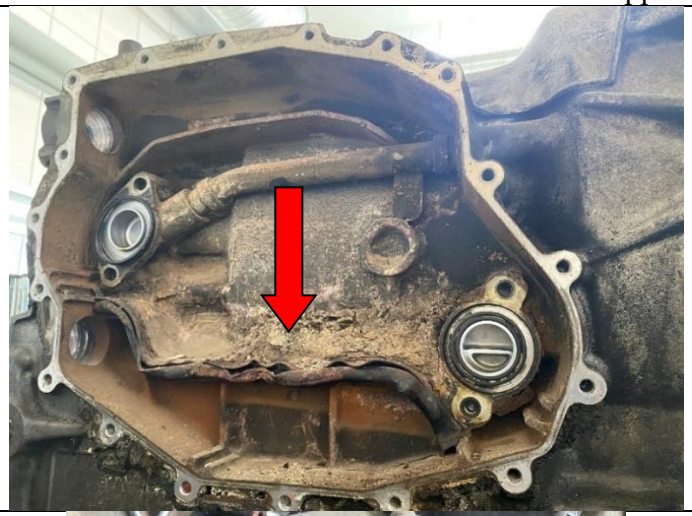
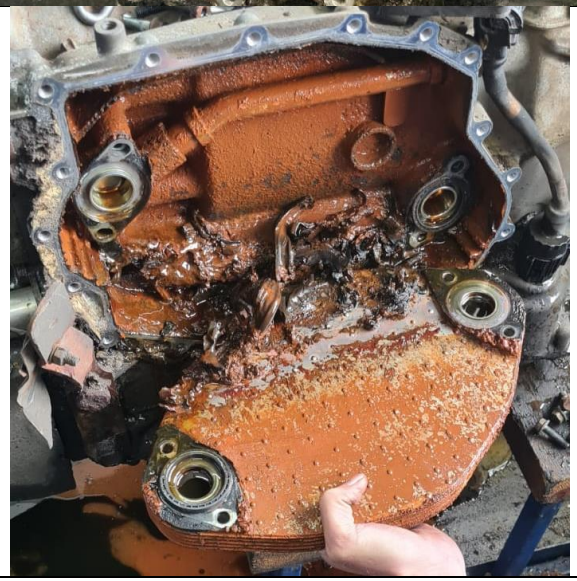
Дефектное состояние	Исправное состояние
3.2. Перегрев полого вала фрикционной муфты «А», по причине заклинивания фрикционных дисков	
	
	
	

3.3. Перегрев полого вала фрикционной муфты «А», по причине проскальзывание фрикционных дисков



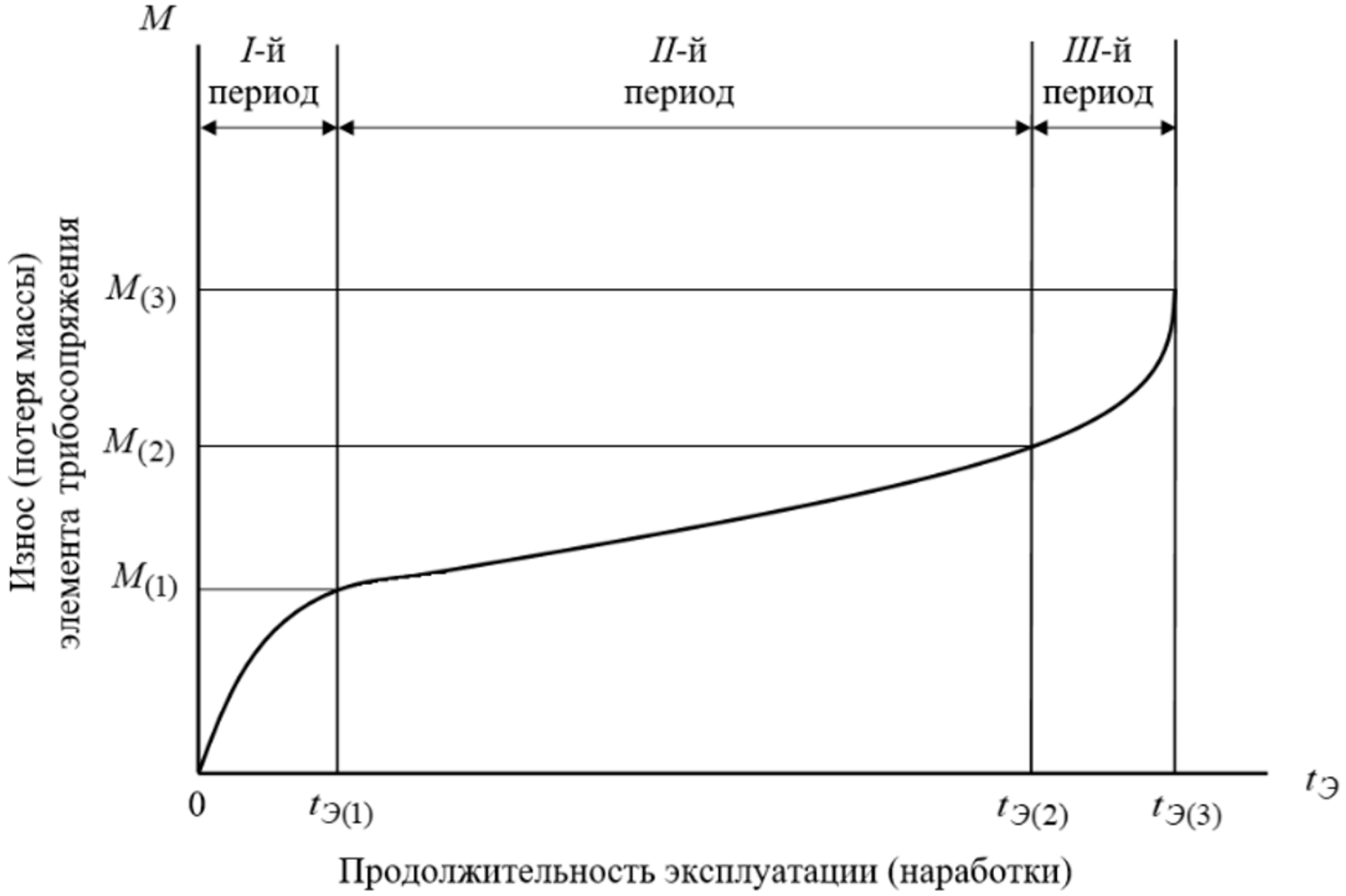




4. Химическая коррозия	
4.1. Химическая коррозия металла корпуса в боковом теплообменнике	
	
	

ПРИЛОЖЕНИЕ Л

Зависимость износа элемента трибосопряжения от продолжительности эксплуатации



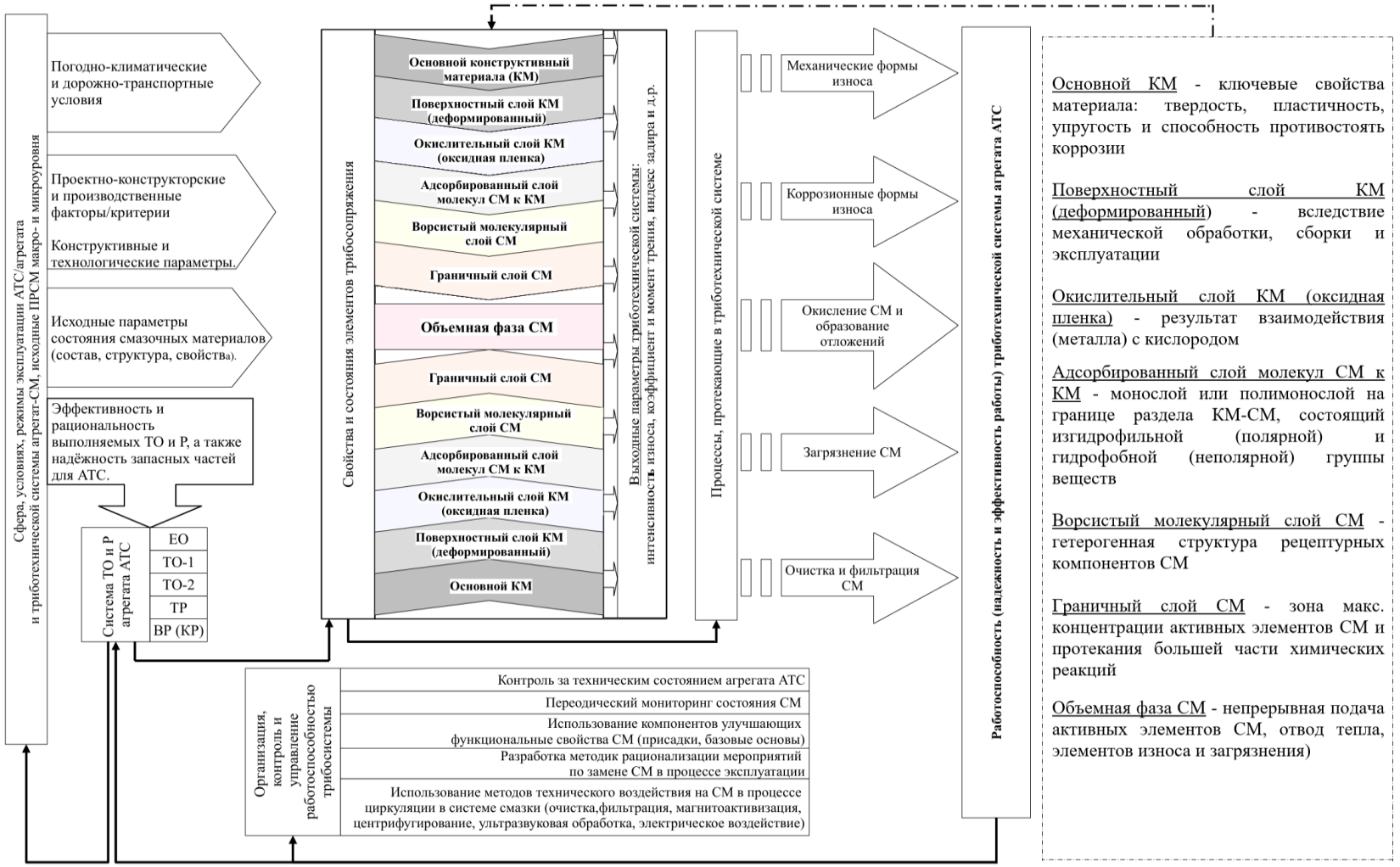
ПРИЛОЖЕНИЕ М

Корреляционная матрица взаимосвязи макро- и микроуровневых ФХ параметров СМ

Параметры	Дистанционная корреляция	Корреляция Спирмена	Корреляция Кендалла	Корреляция Пирсона																														
	Наработка СМ, (L)	Наработка СМ, (L)	Наработка СМ, (L)	Наработка СМ, (L)	Макроуровень											Микроуровень																		Триботехнические параметры	
					Вязкость при 40°С, мм²/с	Вязкость при 100°С, мм²/с	Индекс вязкости (ИВ)	Общее кислотное число (ОКЧ), мг КОН/г	Плотность при 15°С, (ρ), kg/m³	Температура вспышки (Твсп.), °С	Температура застывания (Тзаст.), °С	Коррозия медной пластины (Кмп), балл	Показатель активности ионов водорода (Н)	Моющих свойств (DS), % масс.	Химические элементы-индикаторы износа конструктивных деталей, накапливающихся в СМ			Содержание осадка %вл	Химические элементы-индикаторы загрязнения СМ			Химически активные элементы присадок в СМ						Показатели группового углеводородного состава СМ			Интенсивность изнашивания, мкм/ск	Коэффициента трения
	L	L	L	L	υ (40°C)	υ (100°C)	ИВ	Nкч	ρ	Т всп.	Т заст.	Кмп	pH	DS	Al	Fe	Cu	С осад.	Na	Si	С воды	P	Zn	Ca	Mg	B	S	$CH_{АУ}$	$CH_{ННУ}$	$CH_{НПУ}$	$I_и$	$f_т$
L	1,000000	1,000000	1,000000	1,00																														
υ (40°C)	0,999998	0,999998	0,999998	-0,92	1,00																													
υ (100°C)	0,999998	0,999998	0,999998	**-0,99**	1,00	1,00																												
ИВ	0,999998	0,999998	0,999998	-0,91	0,98	0,99	1,00																											
Nкч	0,999998	0,999998	0,999998	**0,96**	-0,98	-0,99	-0,97	1,00																										
ρ	0,999998	0,999998	0,999998	0,74	-0,94	-0,93	-0,89	0,91	1,00																									
Т всп.	0,999998	0,999998	0,999998	**-0,98**	0,95	0,96	0,96	-0,97	-0,82	1,00																								
Т заст.	0,865883	0,638533	0,638533	-0,82	0,65	0,67	0,66	-0,76	-0,52	0,80	1,00																							
Кмп	0,768668	0,768668	0,768668	0,73	-0,88	-0,88	-0,82	0,85	0,90	-0,79	-0,47	1,00																						
pH	0,999998	0,999998	0,999998	-0,94	-0,97	-0,98	-0,97	-0,05	0,74	-0,96	-0,88	0,72	1,00																					
DS	0,815883	0,695773	0,695773	-0,88	-0,98	-0,99	-0,98	0,33	0,77	-0,97	-0,83	0,75	0,88	1,00																				
Al	0,999998	0,999998	0,999998	**0,99**	-0,93	-0,94	-0,93	0,96	0,80	-0,98	-0,78	0,79	-0,99	-0,88	1,00																			
Fe	0,999998	0,999998	0,999998	**0,96**	-0,96	-0,97	-0,98	0,97	0,83	-0,99	-0,73	0,82	-0,99	-0,83	0,97	1,00																	
Cu	0,999998	0,999998	0,999998	**0,99**	-0,87	-0,89	-0,88	0,93	0,72	-0,96	-0,84	0,72	-0,97	-0,78	0,99	0,94	1,00																
С осад.	0,999998	0,999998	0,999998	**0,96**	-0,97	-0,98	-0,98	0,98	0,85	-0,99	-0,75	0,82	-0,95	-0,73	0,97	1,00	0,93	1,00															
Na	0,999998	0,999998	0,999998	**0,98**	-0,86	-0,88	-0,89	0,91	0,67	-0,96	-0,85	0,69	-0,97	-0,77	0,97	0,95	0,98	0,94	1,00														
Si	0,999998	0,999998	0,999998	0,35	-0,92	-0,93	-0,93	0,96	0,77	-0,99	-0,84	0,76	-0,87	-0,80	0,98	0,97	0,98	0,98	0,98	1,00													
С воды	0,999998	0,999998	0,999998	0,94	-0,97	-0,97	-0,97	0,95	0,85	-0,96	-0,65	0,87	0,77	0,83	0,96	0,99	0,92	0,97	0,91	0,94	1,00												
P	0,999998	0,999998	0,999998	**-0,98**	0,94	0,95	0,94	-0,98	-0,83	0,99	0,81	-0,77	-0,98	-0,78	-0,98	-0,96	-0,97	-0,97	-0,95	-0,98	-0,93	1,00											
Zn	0,999998	0,999998	0,999998	**-0,99**	0,88	0,89	0,88	-0,94	-0,73	0,96	0,86	-0,73	-0,96	-0,78	-0,99	-0,94	-0,99	-0,94	-0,97	-0,98	-0,91	0,98	1,00										
Ca	0,999998	0,999998	0,999998	**-0,97**	0,95	0,96	0,94	-0,99	-0,87	0,97	0,78	-0,81	-0,96	-0,78	-0,98	-0,96	-0,96	-0,96	-0,93	-0,96	-0,94	0,99	0,97	1,00									
Mg	0,999998	0,999998	0,999998	-0,89	0,98	0,98	0,98	-0,97	-0,93	0,93	0,65	-0,87	-0,93	-0,71	-0,92	-0,94	-0,87	-0,95	-0,84	-0,91	-0,95	0,93	0,87	0,94	1,00								
B	0,999998	0,999998	0,999998	**-0,99**	0,94	0,95	0,95	-0,98	-0,81	0,99	0,80	-0,79	-0,94	-0,74	-0,99	-0,98	-0,98	-0,98	-0,97	-0,99	-0,96	0,99	0,98	0,99	0,93	1,00							
S	0,999998	0,999998	0,999998	-0,94	0,94	0,95	0,96	-0,94	-0,81	0,95	0,65	-0,77	-0,91	-0,75	-0,97	-0,97	-0,94	-0,96	-0,92	-0,94	-0,97	0,95	0,92	0,95	0,94	0,97	1,00						
$CAУ$	0,999998	0,999998	0,999998	0,94	0,94	0,92	0,92	-0,04	-0,82	0,98	0,77	-0,80	-0,96	-0,81	0,99	0,98	0,99	0,92	0,82	0,95	0,87	0,88	0,86	-0,43	0,73	0,66	0,47	1,00					
$CHНУ$	0,999998	0,999998	0,999998	0,93	0,93	0,89	0,88	0,17	-0,79	0,99	0,78	-0,80	-0,97	-0,87	0,93	0,94	0,91	0,87	0,73	0,74	0,77	0,66	0,88	-0,57	0,54	0,63	0,67	0,88	1,00				
$CHПУ$	0,999998	0,999998	0,999998	0,91	0,92	0,86	0,87	-0,29	-0,76	0,97	0,80	-0,79	-0,94	-0,95	0,94	0,96	0,91	0,90	0,92	0,94	0,70	0,91	0,92	-0,69	0,89	0,94	0,90	0,94	0,87	1,00			
$I_и$	0,999998	0,999998	0,999998	**0,99**	-0,99	-0,99	-0,98	0,99	0,91	-0,97	-0,70	0,86	-0,91	-0,93	0,96	0,98	0,92	0,98	0,91	0,95	0,98	-0,96	-0,92	-0,98	-0,98	-0,97	-0,93	0,91	0,89	0,87	1,00		
$f_т$	0,999998	0,999998	0,999998	-0,94	-0,92	-0,93	-0,93	0,96	0,78	-0,98	-0,82	0,75	-0,88	-0,96	0,99	0,97	0,99	0,97	0,98	0,99	0,94	-0,99	-0,99	-0,98	-0,91	-0,99	-0,96	0,95	0,91	0,88	0,95	1,00

ПРИЛОЖЕНИЕ Н

Схема функционирования триботехнической системы «среда – агрегат – СМ»



Основной КМ - ключевые свойства материала: твердость, пластичность, упругость и способность противостоять коррозии

Поверхностный слой КМ (деформированный) - вследствие механической обработки, сборки и эксплуатации

Окислительный слой КМ (оксидная пленка) - результат взаимодействия (металла) с кислородом

Адсорбированный слой молекул СМ к КМ - монослой или полимонослой на границе раздела КМ-СМ, состоящий изгидрофильной (полярной) и гидрофобной (неполярной) группы веществ

Ворсистый молекулярный слой СМ - гетерогенная структура рецептурных компонентов СМ

Граничный слой СМ - зона макс. концентрации активных элементов СМ и протекания большей части химических реакций

Объемная фаза СМ - непрерывная подача активных элементов СМ, отвод тепла, элементов износа и загрязнения)

ПРИЛОЖЕНИЕ П

Методика проведения эксплуатационных испытаний

«УТВЕРЖДАЮ»
Главный инженер – заместитель
генерального директора
СПб ГУП «Пассажиравтотранс»



_____А.Н. Беляев

_____2022 г.

Методика
проведения эксплуатационных испытаний
технических жидкостей агрегатов трансмиссии

1. Общие положения

1.1 Настоящая методика разработана для обеспечения единообразного подхода к проведению эксплуатационных испытаний технических жидкостей, применяемых в агрегатах трансмиссии подвижного состава СПб ГУП «Пассажиравтотранс» (далее – ПАТ), с учётом требований действующих нормативных документов в данной области.

1.2 Целью проведения эксплуатационных испытаний является оценка пригодности технических жидкостей для эксплуатации в агрегатах трансмиссии подвижного состава ПАТ и выработка рекомендаций по особенностям их эксплуатации (в случае необходимости).

1.3 При проведении испытаний предполагается выполнение четырех этапов:

Этап №1. Лабораторное определение параметров новой (не бывшей в эксплуатации) технической жидкости.

Этап №2. Эксплуатация технической жидкости в агрегате (агрегатах) подвижного состава в течение определенное наработки.

Этап №3. Лабораторное определение параметров бывшей в эксплуатации технической жидкости.

Этап №4. Сравнение значений параметров новой и бывшей в эксплуатации технической жидкости и оценка ее пригодности для дальнейшей эксплуатации с выработкой при необходимости рекомендаций.

1.4 Главным инженером – заместителем генерального директора ПАТ назначаются руководители проведения испытаний.

1.5 Руководителями проведения испытаний могут назначаться:

1.5.1 Специалисты и руководители подразделений из состава службы главного инженера ПАТ.

1.5.2 Специалисты и руководители подразделений автобусных парков – филиалов ПАТ.

1.6 По завершению испытаний руководители испытаний в течении пяти рабочих дней предоставляют главному инженеру – заместителю генерального директора ПАТ заключение по форме приложения №1.

1.7 Положения методики обязательны к исполнению всеми участниками испытаний.

2. Порядок проведения лабораторного анализа параметров технической жидкости новой и бывшей в эксплуатации (первый и третий этап испытаний)

2.1 Перечень параметров для проведения лабораторного анализа проб и при необходимости, график отбора проб технической жидкости определяется руководителями испытаний. Данные документы могут корректироваться по решению руководителей испытаний в процессе их проведения.

2.2 Место (организация) проведения лабораторных анализов определяется руководителями испытаний с согласованием главного инженера – заместителя генерального директора ПАТ.

2.3 Для проведения лабораторного анализа осуществляется отбор проб.

2.4 Пробы отбираются:

2.4.1 Для новой (не бывшей в эксплуатации) технической жидкости из емкости, резервуара, тары и др.

2.4.1 Для бывшей в эксплуатации технической жидкости из агрегата, магистралей системы и др.

2.5 Для отбора проб создается комиссия.

2.6 Отбор проб технических жидкостей осуществляется:

2.6.1 В плановом порядке в соответствии с графиком отбора проб.

2.6.2 В неплановом порядке по заявке структурного подразделения автобусного парка.

2.7 Отбор проб, хранение и их транспортировка совершается назначенным ответственным лицом. Данное лицо входит в состав комиссии.

2.8 Ответственному лицу при отборе проб необходимо руководствоваться инструкцией согласно приложению №2.

2.9 Отбор проб оформляется актом по форме приложения №3.

2.10 Отобранные пробы ответственным лицом передаются в лабораторию для проведения анализа параметров.

2.11 После проведения лабораторного анализа параметров технической жидкости руководители испытаний получают от лаборатории документ (протокол/акт/отчёт), содержащий результаты лабораторных исследований.

3. Порядок проведения подконтрольной эксплуатации технической жидкости на подвижном составе (второй этап испытаний)

3.1 Для организации испытаний назначенными руководителями разрабатывается и согласовывается с главным инженером – заместителем

генерального директора ПАТ техническое задание на подконтрольные эксплуатационные испытания технической жидкости на подвижном составе ПАТ.

Техническое задание должно содержать:

- требования к условиям эксплуатации (маршрут, пассажиропоток маршрута, климатические условия и т.д.);
- марку и модель агрегата(ов);
- год изготовления;
- общий пробег с начала эксплуатации;
- среднесуточный пробег наработки;
- техническое состояние агрегата (отсутствие/наличие восстановительного капитального ремонта). При наличии восстановительных капитальных ремонтов предоставляется полная информация по выполненным работам руководителям испытаний;
- общий объем наработки испытаний. Определяется руководителями испытаний, исходя из поставленных целей и задач.

При необходимости могут быть добавлены другие параметры и требования.

3.2 Определяются подконтрольные транспортные средства (далее – ТС) из числа подвижного состава для проведения эксплуатационных испытаний технической жидкости.

3.3 Оформляется список выбранных ТС, в котором указывается: марка и модель, год изготовления (в соответствии с ПТС), гаражный номер, государственный регистрационный номер, общий пробег с начала эксплуатации.

3.4 Осуществляется техническая подготовка агрегата трансмиссии ТС:

3.4.1 Выполняется проверка агрегата на герметичность (отсутствие запотеваний, подтёков, течей). Агрегаты с нарушением герметичности до испытаний не допускаются.

3.4.2 Выполняется процедура промывки агрегата для получения более достоверных результатов. Алгоритм данной процедуры, следующий:

3.4.2.1 Агрегат прогревается до рабочей температуры, для обеспечения максимальной эффективности операции по сливу технической жидкости.

3.4.2.2 Выполняется операция по сливу технической жидкости с агрегата.

3.4.2.3 Производится заправка агрегата испытуемой технической жидкостью в соответствии с технической документацией агрегата, обратить внимание на технологию контроля уровня заправляемой жидкости. Для заправки используются только чистые ёмкости.

3.4.2.4 Проводится дорожный (ездовой) цикл эксплуатации ТС на городском маршруте с объемом наработки 150-200 км.

3.4.2.5 Выполняется процедура замены технической жидкости в соответствии с технической документацией агрегата на испытываемую жидкость.

3.4.3 При выполнении пункта 3.4.2.5:

3.4.3.1 Фиксируется дата и наработка общего пробега подконтрольного агрегата.

3.4.3.2 Выполняется операция по сливу технической жидкости с агрегата.

3.4.3.3 Выполняется операция по замене фильтрующего элемента агрегата на новый. Данный пункт выполняется, если фильтрующий элемент предусмотрен конструкцией агрегата.

3.4.3.4 Производится заправка агрегата испытуемой технической жидкостью в соответствии с технической документацией агрегата, обратить внимание на технологию контроля уровня заправляемой жидкости. Для заправки используются только чистые ёмкости.

3.4.3.5 Выполняется замер объёма заправленной испытуемой технической жидкости.

3.4.4 Повторно выполняется проверка агрегата на герметичность (отсутствие запотеваний, каплеобразований, подтёков, течей).

3.5 Далее осуществляется подконтрольная эксплуатация ТС в рабочих режимах при выполнении транспортной работы на маршрутах города в соответствии с техническим заданием на эксплуатационные испытания технической жидкости.

3.6 Ежедневно осуществляется визуальный контроль технического состояния агрегата силами структурного подразделения – отдела технического контроля (далее – ОТК) при проверке ТС при выезде на линию (маршрут выполнения транспортной работы) и по возвращению в автобусный парк, а именно на предмет контроля за состоянием герметичности агрегата и уровня жидкости при рабочих температурах.

3.6.1 При выявлении/отсутствии отклонений уровня жидкости и выявлении/отсутствии нарушений герметичности агрегата:

3.6.1.1 При выявлении уровня ниже нормы и отсутствии нарушений герметичности на начальных этапах испытаний (пробег 200-500 км) следует довести уровень жидкости до нормы, фиксируя пробег и дозаправленный объем в акте по форме приложения №4.

3.6.1.2 При обнаружении нарушения герметичности и отклонения уровня ниже нормы на всех этапах испытаний сообщаются начальнику ОТК и руководителям испытаний для принятия дальнейших решений. Фиксируется неисправность в акте по форме приложения №4, указав место неисправности.

3.6.1.3 При выявлении уровня больше нормы и отсутствии нарушений герметичности, фиксируется и передается данное несоответствие начальнику ОТК и руководителям испытаний для принятия дальнейших решений. Зафиксировать неисправность в акте по форме приложения №4.

3.6.2 Особое внимание при визуальном техническом осмотре следует уделять состоянию резинотехнических изделий (далее – РТИ), а именно сальниковым уплотнения валов, самовулканизирующим и композитным материалам для герметизации торцевого уплотнения, а также состоянию клапана «сапуна», предназначенного для уравнивания/сброса внутреннего давления агрегата с внешним атмосферным давлением в процессе эксплуатации.

3.6.3 Для агрегатов трансмиссии с гидромеханическими системами управления, которые имеют в своей конструкции электронный блок управления и температурные датчики:

Начальником ОТК осуществляется инструктаж водителей, работающих на подконтрольных ТС, об обязательном контроле за индикатором срабатывания превышения температурного состояния масла в агрегате трансмиссии и фиксации даты, времени (продолжительности) срабатывания.

3.7 Начальником ОТК еженедельно начиная со дня испытаний, направляются руководителям испытаний отчетные документы согласно приложению №4, в электронном виде в формате Excel.

Дополнительно предоставляются фото и видео материалы подтверждающие выявленные неисправности агрегата.

4. Проведения сравнительной оценки технической жидкости по результатам испытаний (четвертый этап испытаний)

4.1 По завершению испытаний на основе полученных результатов лабораторных анализов технической жидкости и отчётных документов по контролю технического состояния агрегата руководители испытаний оформляют заключение по форме приложения №1.

Подготовил:

Главный специалист Управления промышленной безопасности и охраны труда _____ В.В. Орехов

Согласовано:

Начальник Управления промышленной безопасности и охраны труда _____ М.А. Мишанов

Начальник Управления ресурсного обеспечения _____ Ю.В. Чмиль

Заведующий кафедрой технической эксплуатации транспортных средств ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» _____ И.О. Черняев

Приложение № 2

Санкт-Петербургское
государственное унитарное предприятие
пассажирского автомобильного транспорта
(СПб ГУП «Пассажиравтотранс»)

ИНСТРУКЦИЯ
по отбору проб технических жидкостей
агрегатов трансмиссии

№ ТИ-01/22

г. Санкт-Петербург
2022

1 Общие требования

1.1 Настоящая инструкция определяет порядок и последовательность отбора проб технических жидкостей, применяемых в агрегатах трансмиссии для получения репрезентативной пробы, т.е. отобранная часть технической жидкости для лабораторных испытаний должна максимально точно выражать состояние всего объема жидкости в агрегате.

1.2 Действие норм и правил, которые содержит настоящая инструкция, распространяется на все структурные подразделения, в которых проводятся настоящие работы.

1.3 При разработке настоящей инструкции использовались и были учтены требования следующих нормативных документов:

- ГОСТ 2517-2012 Межгосударственный стандарт. Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб.
- Американское Общество по Испытаниям и Материалам (ASTM) «Стандартная технология ручного отбора проб нефти и нефтепродуктов» (D4057-22).
- ISO 3170-2004 («Руководство нефтяного института (IP) по измерению нефтепродуктов, часть VI, раздел I «Отбор проб», методы ручного отбора проб, 2-ое издание»).

1.4 Для воспроизводимости и достоверности результатов лабораторных испытаний, отбор проб осуществляется из одних и тех же определенных ранее точек агрегата, и тем же самым способом с соблюдением значения интервала наработки для отбора пробы. А также с соблюдением рабочих условий агрегата и правил отбора проб. Нарушение правил и условий отбора проб могут отрицательно повлиять на полученные результаты входе лабораторных испытаний. В некоторых случаях может потребоваться повторный отбор пробы (чаще всего это сделать невозможно), что приведёт к потере времени. Поэтому, неправильно организованный отбор пробы приводит к неверному заключению.

1.5 Объем отбора технической жидкости для лабораторных испытаний зависит от выбранного и необходимого комплекса проверяемых параметров.

2 Требования безопасности

2.1 Перед началом работ по отбору проб необходимо получить полную информацию о всех возможных опасностях и рисках для здоровья по каждой точке отбора и отбираемой технической жидкости.

2.2 Соблюдайте стандартные меры безопасности по обслуживанию транспортных средств. Если пары технической жидкости легковоспламеняющиеся или токсичные, избегайте вдыхания паров и не используйте открытого пламени или сигареты. Минимизируйте возможность статического воспламенения или искрения. Если используются металлические емкости пробоотборников, то они должны быть сделаны из материалов, не накапливающих статическое электричество.

2.3 Отбирайте пробу используя средства индивидуальной защиты.

2.4 Не допускайте разливов технических жидкостей при отборе проб и устраняйте их не замедленно, если они произошли. Соблюдайте чистоту процесса отбора.

2.5 Выбирайте место с наиболее безопасным доступом к точке отбора проб, учитывая необходимые условия.

2.6 Не выбирайте места точек отбора там, где:

2.6.1 Техническая жидкость находится под давлением и высокой температурой.

2.6.2 У точки отбора размещено потенциально опасное электрооборудование.

3 Определение мест точек отбора проб

3.1 Не рекомендуется выбирать для отбора проб точки, где поток технической жидкости ограничен или где имеется тенденция к накоплению концентрации продуктов износа и частиц загрязняющих отложений.

3.2 Не отбираются пробы из сливных шлангов или сливного клапана резервуара или отстойников, то есть из мест застойных зон систем агрегата.

3.3 Проба отбирается из точек, где осуществляется постоянное перемешивание технической жидкости в процессе работы агрегата.

3.4 Для отбора проб должна использоваться одна и та же точка отбора.

3.5 Рекомендуются следующие точки отбора для агрегатов трансмиссии автомобильных транспортных средств:

- контрольная пробка/отверстие уровня технической жидкости;
- канал измерительного зонда уровня технической жидкости (щупа).

4 Оборудование для отбора проб

4.1 Отбор проб осуществляется с использованием надлежащего чистого оборудования и пробоотборных емкостей:

4.1.1 Вакуумный ручной насос, должен быть промытый и сухой.

4.1.2 Пробоотборная трубка, должна быть новой и чистой.

4.1.3 Пробоотборная емкость, должна быть закрытой, неиспользованной и чистой. Для отбора проб технических жидкостей используются стеклянные, пластиковые и металлические емкости. Металлические и пластиковые емкости должны иметь одобренную конструкцию, а также изготовлены из конструктивного материала, предназначенного для отбираемых технических жидкостей.

5 Порядок отбора проб

5.1 Подготовка точки отбора:

5.1.1 Отбор проб осуществляется в процессе работы агрегата или не позднее 30 минут после остановки.

5.1.2 Для проведения правильного и точного лабораторного анализа технической жидкости, отбор проб требуется выполнять из прогретого

до рабочей температуры агрегата (80-90 градусов), соответствующей рабочей температуре при эксплуатации.

5.1.3 Не следует производить отбор проб сразу же после замены технической жидкости или непосредственно после доливки большого объема новой жидкости, а также после длительной стоянки транспортного средства.

5.1.4 Очистите от загрязнения область около точки отбора пробы.

5.1.5 Обеспечьте доступ к очищенной точке к отбираемой технической жидкости.

5.2 Подготовка оборудования для отбора пробы:

5.2.1 Вставьте пробоотборную трубку через крышку вакуумного насоса и зажмите кольцевой замок. (Трубка должна быть зафиксирована, но не передавлена!). Не погружайте пробоотборную трубку больше чем на 1 см в проботборную емкость.

5.2.2 Убедитесь, что диаметр горлышка пробоотборной емкости соответствует диаметру вакуумного насоса.

5.2.3 Откройте пробоотборную емкость и вкрутите её в вакуумный насос и плотно затяните.

5.2.4 Срежьте нижний конец пробоотборной трубки под углом 45°.

5.3 Процесс отбора пробы:

5.3.1 Погрузите пробоотборную трубку в отбираемую техническую жидкость агрегата, на такую глубину, при которой пробоотборная трубка не будет касаться дна картера/резервуара. Рекомендуется перед отбором измерить трубкой расстояние до дна картера/резервуара, и сделать отметку на трубке при достижении ей дна, а затем достать трубку так, чтобы проба взялась из серединного слоя технической жидкости.

5.3.2 Выполните пробный цикл движений поршнем вакуумного насоса. (Если сопротивление отсутствует, опустить пробоотборную трубку ниже, пока не появиться сопротивление).

5.3.3 Сделайте два, три цикла накачивания (хода поршня вакуумного насоса) и дождитесь набора технической жидкости в пробоотборную емкость.

5.3.4 Через каждые 3-5 секунд повторяйте один цикл накачивания. Повторять до набора нужного объема технической жидкости.

5.3.5 При отборе пробы, емкость с вакуумным насосом держите вертикально, для предотвращения попадания технической жидкости в цилиндр вакуумного насоса. Если это произошло, разберите и промойте части насоса керосином. Не используйте бензин или смывку для смазок. Соберите насос после сушки деталей.

5.3.6 Наполните пробоотборную емкость не более чем на 90% от её объема (при отборе технической жидкости необходимо остановиться примерно на расстоянии 2-3 см, до полного извлечения. Подымите трубку выше уровня отбираемой технической жидкости и выполните еще несколько циклов накачивания, тем самым сбросив давление и удалив полностью техническую жидкость из трубки).

5.3.7 Удалите трубку из вакуумного насоса и точки отбора.

5.3.8 Отсоедините пробоотборную ёмкость от вакуумного насоса и герметично закройте её пробкой или винтовой крышкой с прокладкой, не растворяющейся в технической жидкости.

5.3.9 Разожмите кольцевой замок вакуумного насоса и удалить используемую пробоотборную трубку. Трубку впоследствии можно очистить керосином и высушить или утилизировать.

5.3.10 Внешнюю поверхность пробоотборной ёмкости необходимо вытереть насухо для нанесения маркировки – этикетки.

5.3.11 Пробоотборное оборудование должно быть очищено сразу после использования и должно храниться только в чистом виде.

6 Оформление и маркировка проб

6.1 Маркировка – этикетка наклеивается сразу после отбора пробы технической жидкости на пробоотборную ёмкость. Маркировка – этикетка должна содержать следующую информацию:

- дата;
- время;
- номер пробы по учёту (1-ая, 2-ая, 3-ая … и т.д.);
- объём пробы, (мл);
- № партии (указывается при отборе новой (не бывшей в эксплуатации) технической жидкости);
- наименование продукта (марка и спецификация);
- температура технической жидкости при отборе (указывается при наличии температурной индикации), (°С);
- наработка, (км) или продолжительность работы, (мото-час.);
- должность и фамилии лица, отобравшего и опечатавшего пробу.

6.2 На каждую проботбороную емкость после отбора пробы фиксируется номерная опечатывающая пломба (бирка), тем самым опечатывая пробу и присваивая пробе идентификационный номер, который фиксируется в акте отбора пробы технической жидкости.

6.3 Ответственны за отбор пробы:

6.3.1 Заполняет сопровождающий образец регистрационной формы, согласно образцу лаборатории, точно указав всю необходимую информацию.

6.3.2 Передаёт пробы вместе с заполненными регистрационными формами в лабораторию, которая будет проводить испытания.

7 Транспортирование и хранение

7.1 Пробы хранят в помещении, отвечающем противопожарным требованиям, предъявляемым к кладовым легковоспламеняющихся и горючих жидкостей. Пробы нефти и нефтепродуктов с нормированным давлением насыщенных паров хранят при температуре не выше 20 °С.

7.2 Пробы хранят в шкафу с естественной вентиляцией или на стеллажах, которые изготавливаются из негорючих материалов.

7.3 Не рекомендуется, хранить пробы до отправки в лабораторию более 45 суток со дня отбора.

Подготовил:

Главный специалист Управления
промышленной безопасности и охраны труда В.В. Орехов
17 10 2022

Согласовано:

Начальник Управления
промышленной безопасности и охраны труда М.А. Мишанов
17 10 2022

Начальник Управления ресурсного
обеспечения Ю.В. Чмиль
17 10 2022

Приложение №3

Санкт-Петербургское
государственное унитарное предприятие
пассажирского автомобильного транспорта
(СПб ГУП «Пассажиравтотранс»)

СВОДНЫЙ АКТ
ОТБОРА ПРОБ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

№ 2300/SS6-ZM-n/12 09.01.2025

Место отбора пробы: г. Санкт-Петербург, ул. Автобусная, д. 8
(адрес)

Комиссия в составе:

Попов А.Б. – Начальник Производственно-технический отдела Автобусного парк №2 – филиал СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

Степанишин Р.А. – Инженер Производственно-технический отдела Автобусного парк №2 – филиал СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

Журавлев А.Н. – Начальник Централизованного участка по ремонту и техническому обслуживанию ГМКП Автобусного парк №6 – филиал СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

произвела отбор пробы технической жидкости в соответствии с требованиями ГОСТ 2517-2012 в рамках подконтрольной эксплуатации, согласно следующему перечню:

Дата отбора	Время отбора	Номер пломбы	Наименование тех. жид.	Место отбора пробы (емкость, резервуар, агрегат ТС и др.)	Наработка, (км)	Кол-во отобранного образца, (мл)	Кол-во тех. жид. от которой отобрана проба, (л)
1	2	3	4	5	6	7	8
03.01.2023	1:40:00	B1588746	[illegible]	[illegible]	15 000	565	42
10.03.2023	1:21:00	B1588747	[illegible]	[illegible]	30 000	565	42
15.05.2023	1:14:00	B1588748	[illegible]	[illegible]	45 000	565	42
20.07.2023	0:32:00	B1588749	[illegible]	[illegible]	60 000	565	42
24.09.2023	1:35:00	B1588750	[illegible]	[illegible]	75 000	565	42
29.11.2023	1:26:00	B1588751	[illegible]	[illegible]	90 000	565	42
03.02.2024	0:15:00	B1588752	[illegible]	[illegible]	105 000	565	42
09.04.2024	1:16:00	B1588753	[illegible]	[illegible]	120 000	565	42
14.06.2024	1:28:00	B1588754	[illegible]	[illegible]	135 000	565	42
19.08.2024	1:02:00	B1588755	[illegible]	[illegible]	150 000	565	42
24.10.2024	1:09:00	B1588756	[illegible]	[illegible]	165 000	565	42
29.12.2024	1:37:00	B1588757	[illegible]	[illegible]	180 000	565	42

Ответственный за отбор/хранение/транспортировку проб:

Орехов В.В. – Главный специалист Управления промышленной безопасности и охраны труда СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

Подписи членов комиссии/присутствующих лиц:

Попов Алексей Борисович _____
(Ф.И.О., подпись)

Степанишин Роман Алексеевич _____
(Ф.И.О., подпись)

Журавлев Алексей Николаевич _____
(Ф.И.О., подпись)

Санкт-Петербургское
государственное унитарное предприятие
пассажирского автомобильного транспорта
(СПб ГУП «Пассажиравтотранс»)

СВОДНЫЙ АКТ
ОТБОРА ПРОБ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

№ 2301/SS6-ZM-n/12 09.01.2025

Место отбора пробы: г. Санкт-Петербург, ул. Автобусная, д. 8
(адрес)

Комиссия в составе:

Попов А.Б. – Начальник Производственно-технический отдела Автобусного парк №2 – филиал СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

Степанишин Р.А. – Инженер Производственно-технический отдела Автобусного парк №2 – филиал СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

Журавлев А.Н. – Начальник Централизованного участка по ремонту и техническому обслуживанию ГМКП Автобусного парк №6 – филиал СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

произвела отбор пробы технической жидкости в соответствии с требованиями ГОСТ 2517-2012 в рамках подконтрольной эксплуатации, согласно следующему перечню:

Дата отбора	Время отбора	Номер пломбы	Наименование тех. жид.	Место отбора пробы (емкость, резервуар, агрегат ТС и др.)	Наработка, (км)	Кол-во отобранного образца, (мл)	Кол-во тех. жид. от которой отобрана проба, (л)
1	2	3	4	5	6	7	8
03.01.2023	1:15:00	B1588758	[illegible]	[illegible]	15 000	565	42
10.03.2023	1:01:00	B1588759	[illegible]	[illegible]	30 000	565	42
15.05.2023	0:41:00	B1588760	[illegible]	[illegible]	45 000	565	42
20.07.2023	0:12:00	B1588761	[illegible]	[illegible]	60 000	565	42
24.09.2023	1:12:00	B1588762	[illegible]	[illegible]	75 000	565	42
29.11.2023	1:05:00	B1588763	[illegible]	[illegible]	90 000	565	42
03.02.2024	23:38:00	B1588764	[illegible]	[illegible]	105 000	565	42
09.04.2024	0:37:00	B1588765	[illegible]	[illegible]	120 000	565	42
14.06.2024	1:03:00	B1588766	[illegible]	[illegible]	135 000	565	42
19.08.2024	0:41:00	B1588767	[illegible]	[illegible]	150 000	565	42
24.10.2024	0:46:00	B1588768	[illegible]	[illegible]	165 000	565	42
29.12.2024	1:14:00	B1588769	[illegible]	[illegible]	180 000	565	42

Ответственный за отбор и транспортировку проб:

Орехов В.В. – Главный специалист Управления промышленной безопасности и охраны труда СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

Подписи членов комиссии/присутствующих лиц:

Попов Алексей Борисович _____
(Ф.И.О., подпись)

Степанишин Роман Алексеевич _____
(Ф.И.О., подпись)

Журавлев Алексей Николаевич _____
(Ф.И.О., подпись)

Санкт-Петербургское
государственное унитарное предприятие
пассажирского автомобильного транспорта
(СПб ГУП «Пассажиравтотранс»)

СВОДНЫЙ АКТ
ОТБОРА ПРОБ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

№ 2401/SS6-ZM-n/12 09.01.2025

Место отбора про г. Санкт-Петербург, ул. Автобусная, д. 8
(адрес)

Комиссия в составе:

Попов А.Б. – Начальник Производственно-технический отдела Автобусного парк №2 – филиал СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

Степанишин Р.А. – Инженер Производственно-технический отдела Автобусного парк №2 – филиал СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

Журавлев А.Н. – Начальник Централизованного участка по ремонту и техническому обслуживанию ГМКП Автобусного парк №6 – филиал СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

произвела отбор пробы технической жидкости в соответствии с требованиями ГОСТ 2517-2012 в рамках подконтрольной эксплуатации, согласно следующему перечню:

Дата отбора	Время отбора	Номер пломбы	Наименование тех. жид.	Место отбора пробы (емкость, резервуар, агрегат ТС и др.)	Наработка, (км)	Кол-во отобранного образца, (мл)	Кол-во тех. жид. от которой отобрана проба, (л)
1	2	3	4	5	6	7	8
03.01.2023	1:57:00	B1588770	[illegible]	[illegible]	15 000	565	42
10.03.2023	1:41:00	B1588771	[illegible]	[illegible]	30 000	565	42
15.05.2023	1:36:00	B1588772	[illegible]	[illegible]	45 000	565	42
20.07.2023	0:53:00	B1588773	[illegible]	[illegible]	60 000	565	42
24.09.2023	1:55:00	B1588774	[illegible]	[illegible]	75 000	565	42
29.11.2023	1:48:00	B1588775	[illegible]	[illegible]	90 000	565	42
03.02.2024	0:39:00	B1588776	[illegible]	[illegible]	105 000	565	42
09.04.2024	1:36:00	B1588777	[illegible]	[illegible]	120 000	565	42
14.06.2024	2:08:00	B1588778	[illegible]	[illegible]	135 000	565	42
19.08.2024	1:27:00	B1588779	[illegible]	[illegible]	150 000	565	42
24.10.2024	1:34:00	B1588780	[illegible]	[illegible]	165 000	565	42
29.12.2024	1:58:00	B1588781	[illegible]	[illegible]	180 000	565	42

Ответственный за отбор и транспортировку проб:

Орехов В.В. – Главный специалист Управления промышленной безопасности и охраны труда СПб ГУП «Пассажиравтотранс»

Подписи членов комиссии/присутствующих лиц:

Попов Алексей Борисович _____
(Ф.И.О., подпись)

Степанишин Роман Алексеевич _____
(Ф.И.О., подпись)

Журавлев Алексей Николаевич _____
(Ф.И.О., подпись)

Приложение №4

АКТ
ЕЖЕДНЕВНОГО КОНТРОЛЯ
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АГРЕГАТА

№ _____от_____

Гар. № | | Марка и модель ТС: | |

1.Общий пробег ТС на начало испытаний(км):
1.** Общий пробег ТС на момент (замены, капитального ремонта и т.д. (агрегата/узла/механизма):

2.Общая наработка (агрегата/узла/механизма) на начало испытаний (км): "(=1.)" или "(=1.-1.**)"

3.Общий пробег ТС в процессе испытаний (км): "(= последнему значению пробега в таблице)"

4.Наработка технической жидкости: "(=3.-1.)"
(нарастающим итогом)

Наименование / марка технической жидкости: Shell Spirax S6 ATF ZM / Shell Spirax S6 ATF A295 / Rosneft Kinetic ATF III / …

Дата	Пробег (показания одометра) (км)	Герметичность (запотевание, каплеобразование, подтёк, течь)	Уровень	Долив (л)	Срабатывание индикатора превышения температуры масла	Примечание*
01.11.2022		место нарушения герметичности	норма / не норма	объём долива		
…						

* 1. Описание возникающих неисправностей в процессе проведения испытаний.
2. Отбор пробы жидкости, фиксировать отметкой "Отбор пробы".
** 1. При выборе ТС с заменой, капитальным ремонтом и т.д. испытываемого (агрегата/узла/механизма).

ПРИЛОЖЕНИЕ Р

Перечень используемого оборудования для исследования ФХ параметров СМ

№ п/п	Параметр	Идентификация ИО/СИ	Сведения о поверке/аттестации, срок действия
1	Кинематическая вязкость при 40 и 100 ºС. Индекс вязкости	1. Термостат для измерений вязкости жидкостей «ВИС-Т-01», зав. № 014123 2. Термостат для измерения вязкости жидкостей «ВИС-Т», зав. № 013135 3. Термометр лабораторный электронный LTA/СБ-В, зав. № 871338 4. Секундомер СОСпр, зав. № 1332 5. Секундомер СОСпр, зав. № 3187 6. Вискозиметр ВПЖ-4, зав. № 197 7. Вискозиметр ВПЖ-4, зав. № 241 8. Вискозиметр ВПЖ-4, зав. № 51 9. Вискозиметр ВПЖ-4, зав. № 2	1. Аттестат № 435-3717-2021 до 15.11.2025 г. 2. Св-во № С-СП/12-11-2022/203978475 до 11.11.2025 г. 3. Св-во № С-СП/19-12-2022/209474572 до 18.12.2025 г. 4. Св-во № С-СП/25-08-2022/181018033 до 24.08.2025 г. 5. Св-во № С-СП/25-08-2022/ 181018032 до 24.08.2025 г. 6. Паспорт б/н до 04.10.2025 г. 7. Паспорт б/н до 07.08.2026 г. 8. Паспорт б/н до 10.03.2025 г. 9. Паспорт б/н до 10.03.2025 г.
2	Общее кислотное число	1. pH-метр pH-150M, зав. № 0274 2. Весы электронные лабораторные GR- 200, зав. № 14210845 3. Бюретка 1-3-2-5-0,02, зав. № 2	1. Св-во № С-СП/27-02-2023/ 226471615 до 26.08.2025 г. 2. Св-во № С-СП/21-07-2022/ 173723071 до 20.07.2025 г. 3. Клеймо РП от 2013 г. Бессрочно
3	Температура застывания, °С	1. Аппаратура для определения температуры застывания нефтепродуктов ЛЗН-75, зав. № 740 2. Баня лабораторная трехместная W 3, зав. № 2784 3. Термометр ТН-8М, зав. № 63 4. Термометр ТН-8М, зав. № 29 Секундомер СОСпр, зав. № 3414	1. Протокол период. Атт. ИО № 3-2023 до 11.01.2025 г. 2. Протокол период, атт. ИО № 23-2022 до 14.12.2025 г. 3. Св-во № С-СП/06-03-2023/228379335 до 05.03.2025 г. 4. Св-во № С-СП/16-02-2022/133339443 до 15.08.2025 г. 4. Св-во № С-СП/25-08-2022/181018031 до 24.08.2025 г.
4	Температура вспышки в открытом тигле, °С	1. Аппарат для определения температуры вспышки и воспламенения в открытом тигле, зав. № 1785 2. Термометр ТН-2М, зав. № 50 3. Секундомер СОСпр, зав. № 3187 Барометр-анероид М67, зав. № 328	1. Протокол период. Атт. ИО № 19-2022 до 07.12.2025 г. 2. Св-во № 0094714 до 15.06.2025 г. 3. Св-во № С-СП/25-08-2022/181018033 до 24.08.2025 г. Св-во № С-СП/23-11-2022/203640043 до 22.11.2025 г.
5	Плотность при 15 °С, кг/м³	1. Термостат для измерения плотности нефтепродуктов «VT-р-03», зав. № 234009 2. Термометр ТЛ-4, зав. № 771 3. Термометр ТЛ-4, зав. № 739 Ареометр АН, зав. № 1168	1. Протокол период. Атт. ИО № 11-2023 до 02.03.2025 г. 2. Св-во № С-СП/03-02-2021/35148081 до 02.08.2025 г. 3. Св-во № С-СП/19-03-2021/ 48748201 до 18.09.2025 г. Св-во № С-СП/15-12-2021/ 117965352 до 14.12.2025 г.
6	Коррозия медной пластинки, балл	1. Электрошкаф сушильный лабораторный SNOL 58/350, зав. № 1004 Секундомер «Интеграл С-01», зав. № 404051	1. Аттестат № 435-4544-2022 до 23.12.2024 г. Св-во № С-СП/03-04-2023/235621557 до 02.08.2025 г.

7	Содержание воды (метод Карла Фишера), %	1. Весы электронные GX-2000, зав. №14524596 2. Аппарат для количественного определения воды АКОВ-10, инв. № 171 3. Аппарат для количественного определения воды АКОВ-10, инв. № 172 Секундомер СОСпр, зав. № 3187	1. Св-во № С-СП/25-07-2022/ 173723069 до 24.07.2025 г. 2. Протокол период. Атт. ИО № 17-2022 до 02.12.2025 г. 3. Протокол период. Атт. ИО № 18-2022 до 02.12.2025 г. Св-во № С-СП/25-08-2022/181018033 до 24.08.2025 г.
8	Содержание твердых осадков (массовая доля механических примесей), % масс	1. Печь модель PN 60/200, зав. № 12/00/3050 2. Весы электронные лабораторные GR- 300, зав. № 14229282 3. Весы электронные GX-2000, зав. № 14524596 4. Термометр ТН-2М, зав. № 12	1. Аттестат № 435-4543-2022 до 23.12.2024 г. 2. Св-во № С-СП/01-08-2022/ 175185043 до 31.08.2025 г. 3. Св-во № С-СП/25-07-2022/ 173723069 до 24.08.2025 г. 4. Паспорт б/н до 24.10.2025 г.
9	Содержание серы (массовая доля серы), % масс	1. Весы электронные лабораторные GR-300, зав. № 14229282 2. Аппарат для определения содержания серы в темных нефтепродуктах модернизированный ПОСТ-2Мк, зав. № 290 3. Ротаметр РМ (РМ-А-0,063ГУЗ-К), зав. № 1103578 4. Ротаметр РМ (РМ-А-0,063ГУЗ-К), зав. № 1103600	1. Св-во № С-СП/01-08-2022/ 175185043 до 31.08.2025 г. 2. Протокол период. Атт. ИО № 22-2022 до 14.12.2025 г. 3. Сертификат калибровки № 23-18618 до 12.09.2025 г. 4. Сертификат калибровки № 23-18623 до 12.09.2025 г.
10	Элементная спектрометрия (21 химический элемент: Al, Ba, B, Ca, Cr, Cu, Fe, Pb, Mg, Mn, Mo, Ni, K, P, Na, Si, Ag, Sn, Ti, V, Zn), мг/кг	Атомно-эмиссионный спектрометр Prodigy, зав. № 2024	Паспорт б/н до 24.10.2025 г.
11	Инфракрасная спектроскопия Фурье, поглощение, А, и волновое число $см^{-1}$	Спектрометр ФСМ 1201	Паспорт б/н до 13.12.2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ С

Лабораторные отчеты исследований проб СМ

по итогам эксплуатационных испытаний ГМКП автобусов

РЕЗУЛЬТАТЫ

Заказ		1	2	3	4	5
Тип масла		Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM
Образец		31207121	31208685	32209626	31506126	**31708916**
Отбор/Замена масла		Отбор	Отбор	Отбор	Отбор	**Отбор**
Дата отбора		06/10/2023	03/01/2023	10/03/2023	15/05/2023	**20/07/2023**
Дата получения		19/10/2023	13/01/2023	13/03/2023	18/05/2023	**24/07/2023**
Дата выдачи заключения		23/10/2023	17/01/2023	17/03/2023	22/05/2023	**28/07/2023**
Срок службы масла (км)		0	15000	30000	45000	**60000**
Долив масла (л)		0	0.5	0.5	0.5	**0.5**
Описание узла/механизма		-	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	**ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)**
Инвентарный номер		-	2300	2300	2300	**2300**
Индикаторы износа						
Алюминий (Al)	ASTM D5185–18	0	4	8	12	15
Железо (Fe)	ASTM D5185–18	0	17	35	49	67
Хром	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Медь (Cu)	ASTM D5185–18	0	1	6	9	16
Свинец	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Олово	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Серебро ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Никель ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Содержание осадка %m	ASTM D473–22	0.00	0.0016	0.0032	0.0032	0.0094
Температура застывания, °C	ГОСТ 20287–91 Б	-56	-46	-50	-52	-56
Марганец ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Загрязнение						
Содержание воды %	ASTM D6304–07	0.014	0.045	0.096	0.097	0.098
Калий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Натрий (Na)	ASTM D5185–18	0	0	2	4	5
Кремний (Si)	ASTM D5185–18	0	0	1	2	5
Титан ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Ванадий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Содержание серы (S),%m	ASTM D4294–10	0.082	0.0741	0.0732	0.0729	0.0727
Состояние масла						
Температура вспышки в открытом тигле, °C	ASTM D92–18	232	232	230	226	224
Вязкость при 40°C cSt	ASTM D445–06	56.46	56.17	56.00	55.87	55.26
Вязкость при 100°C cSt	ASTM D445–06	10.12	9.992	9.95	9.89	9.81
Индекс вязкости	ASTM D2270–10	169	167	166	165	165
Общее кислотное число мгKOH/г	ASTM D664–18	0.74	0.63	0.51	0.58	0.87
Коррозия медной пластинки	ASTM D130–10	1a	1a	1a	1a	1a
Плотность при 15°C kg/m³	ASTM D4052-22	838.5	837.9	837.2	836.5	836.1
Присадки						
Фосфор (P)	ASTM D5185–18	300	296	294	290	285
Цинк (Zn)	ASTM D5185–18	20	19	17	16	13
Кальций (Ca)	ASTM D5185–18	120	119	116	113	111
Барий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Магний ppm	ASTM D5185–18	5	5	5	5	5
Молибден ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Бор (B)	ASTM D5185–18	110	109	108	106	104

Ведущий инженер /_____/ А.Л.Погорелова

Акционерное общество ОГРН 1027739373182 "СЖС Восток Лимитед" испытательный центр SGS 1 "SGS Vostok Limited" * МОСКВА *

РЕЗУЛЬТАТЫ

Заказ		6	7	8	9	10
Тип масла		Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM
Образец		32204924	32205282	32209628	31708477	**32703530**
Отбор/Замена масла		Отбор	Отбор	Отбор	Отбор	**Отбор**
Дата отбора		24/09/2023	29/11/2023	03/02/2024	09/04/2024	**14/06/2024**
Дата получения		27/09/2023	04/12/2023	06/02/2024	12/04/2024	**17/06/2024**
Дата выдачи заключения		02/10/2023	07/12/2023	12/02/2024	16/04/2024	**21/06/2024**
Срок службы масла (км)		75000	90000	105000	120000	**135000**
Долив масла (л)		0.5	0.5	0.5	0.5	**0.5**
Описание узла/механизма		ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	**ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)**
Инвентарный номер		2300	2300	2300	2300	**2300**
Индикаторы износа						
Алюминий (Al)	ASTM D5185–18	16	20	25	28	**34**
Железо (Fe)	ASTM D5185–18	81	94	100	105	**123**
Хром	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Медь (Cu)	ASTM D5185–18	18	20	22	27	**33**
Свинец	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Олово	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Серебро ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Никель ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Содержание осадка %m	ASTM D473–22	0.0128	0.0162	0.0164	0.0171	**0.0205**
Температура застывания, °C	ГОСТ 20287–91 Б	-57	-58	-59	-60	**-60**
Марганец ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Загрязнение						
Содержание воды %	ASTM D6304–07	0.101	0.113	0.118	0.125	**0.182**
Калий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Натрий (Na)	ASTM D5185–18	5	6	7	8	**8**
Кремний (Si)	ASTM D5185–18	6	6	7	7	**9**
Титан ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Ванадий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Содержание серы (S),%m	ASTM D4294–10	0.0725	0.0705	0.0699	0.0665	**0.0635**
Состояние масла						
Температура вспышки в открытом тигле, °C	ASTM D92–18	219	217	214	214	**208**
Вязкость при 40°C cSt	ASTM D445–06	54.14	52.54	51.04	49.02	**46.83**
Вязкость при 100°C cSt	ASTM D445–06	9.63	9.35	9.08	8.81	**8.48**
Индекс вязкости	ASTM D2270–10	164	163	161	161	**159**
Общее кислотное число мгKOH/г	ASTM D664–18	1.00	1.11	1.38	1.77	**2.04**
Коррозия медной пластинки	ASTM D130–10	1a	1a	1a	1a	**1b**
Плотность при 15°C kg/m³	ASTM D4052-22	836.5	836.8	837.3	838.3	**839.3**
Присадки						
Фосфор (P)	ASTM D5185–18	253	246	240	219	**204**
Цинк (Zn)	ASTM D5185–18	13	10	6	5	**3**
Кальций (Ca)	ASTM D5185–18	105	95	84	64	**47**
Барий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Магний ppm	ASTM D5185–18	5	4	4	4	**3**
Молибден ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Бор (B)	ASTM D5185–18	102	100	99	97	**96**

Ведущий инженер /_____/ А.Л.Погорелова

Акционерное общество "СЖС Восток Лимитед" ОГРН 1027739317182 Испытательный центр SGS 1 "SGS Vostok Limited" * МОСКВА *

РЕЗУЛЬТАТЫ

Заказ		11	12	13
Тип масла		Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM
Образец		31705159	32703177	**31205143**
Отбор/Замена масла		Отбор	Отбор	**Отбор**
Дата отбора		19/08/2024	24/10/2024	**29/12/2024**
Дата получения		22/08/2024	28/10/2024	**09/01/2025**
Дата выдачи заключения		26/08/2024	31/10/2024	**14/01/2025**
Срок службы масла (км)		150000	165000	**180000**
Долив масла (л)		0.5	0.5	**0.5**
Описание узла/механизма		ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	**ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)**
Инвентарный номер		2300	2300	**2300**
Индикаторы износа				
Алюминий (Al)	ASTM D5185–18	39	45	**49**
Железо (Fe)	ASTM D5185–18	155	190	**235**
Хром	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Медь (Cu)	ASTM D5185–18	36	38	**40**
Свинец	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Олово	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Серебро ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Никель ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Содержание осадка %m	ASTM D473–22	0.0272	0.0332	**0.0410**
Температура застывания, °C	ГОСТ 20287–91 Б	-60	-60	**-60**
Марганец ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Загрязнение				
Содержание воды %	ASTM D6304–07	0.238	0.295	**0.345**
Калий ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Натрий (Na)	ASTM D5185–18	9	11	**12**
Кремний (Si)	ASTM D5185–18	10	13	**15**
Титан ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Ванадий ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Содержание серы (S),%m	ASTM D4294–10	0.063	0.062	**0.055**
Состояние масла				
Температура вспышки в открытом тигле, °C	ASTM D92–18	204	196	**188**
Вязкость при 40°C cSt	ASTM D445–06	42.97	37.35	**29.05**
Вязкость при 100°C cSt	ASTM D445–06	7.95	6.85	**5.68**
Индекс вязкости	ASTM D2270–10	158	144	**140**
Общее кислотное число мгKOH/г	ASTM D664–18	2.41	2.97	**3.47**
Коррозия медной пластинки	ASTM D130–10	1b	1b	**1b**
Плотность при 15°C kg/m³	ASTM D4052-22	841.1	842.5	**844.2**
Присадки				
Фосфор (P)	ASTM D5185–18	193	176	**154**
Цинк (Zn)	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Кальций (Ca)	ASTM D5185–18	35	27	**19**
Барий ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Магний ppm	ASTM D5185–18	2	2	**1**
Молибден ppm	ASTM D5185–18	0	0	
Бор (B)	ASTM D5185–18	92	90	**85**

Ведущий инженер /_____/ А.Л.Погорелова

Автономное общество ОГРН 1027739372182 "СЖС Восток Лимитед" Испытательный центр SGS 1 "SGS Vostok Limited" * МОСКВА *

РЕЗУЛЬТАТЫ

Заказ		1	2	3	4	5
Тип масла		Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM
Образец		31207121	31208684	32209625	31506125	**31708915**
Отбор/Замена масла		Отбор	Отбор	Отбор	Отбор	**Отбор**
Дата отбора		06/10/2023	03/01/2023	10/03/2023	15/05/2023	**20/07/2023**
Дата получения		19/10/2023	13/01/2023	13/03/2023	18/05/2023	**24/07/2023**
Дата выдачи заключения		23/10/2023	17/01/2023	17/03/2023	22/05/2023	**28/07/2023**
Срок службы масла (км)		0	15000	30000	45000	**60000**
Долив масла (л)		0	0.5	0.5	0.5	**0.5**
Описание узла/механизма		-	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	**ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)**
Инвентарный номер		-	2301	2301	2301	**2301**
Индикаторы износа						
Алюминий (Al)	ASTM D5185–18	0	5	8	13	16
Железо (Fe)	ASTM D5185–18	0	14	31	45	61
Хром	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Медь (Cu)	ASTM D5185–18	0	1	8	11	15
Свинец	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Олово	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Серебро ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Никель ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Содержание осадка %m	ASTM D473–22	0.00	0.0014	0.0030	0.0031	0.0089
Температура застывания, °C	ГОСТ 20287–91 Б	-56	-48	-50	-52	-55
Марганец ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Загрязнение						
Содержание воды %	ASTM D6304–07	0.014	0.039	0.082	0.095	0.104
Калий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Натрий (Na)	ASTM D5185–18	0	0	1	3	5
Кремний (Si)	ASTM D5185–18	0	0	0	1	5
Титан ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Ванадий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Содержание серы (S),%m	ASTM D4294–10	0.0820	0.0765	0.0752	0.0750	0.0748
Состояние масла						
Температура вспышки в открытом тигле, °C	ASTM D92–18	232	231	230	227	226
Вязкость при 40°C cSt	ASTM D445–06	56.46	56.45	56.24	56.12	55.76
Вязкость при 100°C cSt	ASTM D445–06	10.12	10.09	10.04	9.94	9.89
Индекс вязкости	ASTM D2270–10	169	168	168	165	165
Общее кислотное число мгKOH/г	ASTM D664–18	0.74	0.69	0.57	0.67	0.90
Коррозия медной пластинки	ASTM D130–10	1a	1a	1a	1a	1a
Плотность при 15°C kg/m³	ASTM D4052-22	838.5	837.8	837.2	836.6	836.4
Присадки						
Фосфор (P)	ASTM D5185–18	300	297	296	295	291
Цинк (Zn)	ASTM D5185–18	20	20	19	17	14
Кальций (Ca)	ASTM D5185–18	120	117	114	111	108
Барий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Магний ppm	ASTM D5185–18	5	5	5	5	5
Молибден ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Бор (B)	ASTM D5185–18	110	110	109	107	105

Ведущий инженер /_____/ А.Л.Погорелова



РЕЗУЛЬТАТЫ

Заказ		6	7	8	9	10
Тип масла		Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM
Образец		32204925	32205283	32209629	31708478	**32703531**
Отбор/Замена масла		Отбор	Отбор	Отбор	Отбор	**Отбор**
Дата отбора		24/09/2023	29/11/2023	03/02/2024	09/04/2024	**14/06/2024**
Дата получения		27/09/2023	04/12/2023	06/02/2024	12/04/2024	**17/06/2024**
Дата выдачи заключения		02/10/2023	07/12/2023	12/02/2024	16/04/2024	**21/06/2024**
Срок службы масла (км)		75000	90000	105000	120000	**135000**
Долив масла (л)		0.5	0.5	0.5	0.5	**0.5**
Описание узла/механизма		ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	**ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)**
Инвентарный номер		2301	2301	2301	2301	**2301**
Индикаторы износа						
Алюминий (Al)	ASTM D5185–18	18	23	27	29	**35**
Железо (Fe)	ASTM D5185–18	74	85	94	100	**109**
Хром	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Медь (Cu)	ASTM D5185–18	17	18	21	26	**30**
Свинец	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Олово	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Серебро ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Никель ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Содержание осадка %m	ASTM D473–22	0.0100	0.0134	0.0161	0.0165	**0.0169**
Температура застывания, °C	ГОСТ 20287–91 Б	-57	-58	-59	-60	**-60**
Марганец ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Загрязнение						
Содержание воды %	ASTM D6304–07	0.110	0.116	0.119	0.127	**0.143**
Калий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Натрий (Na)	ASTM D5185–18	5	6	7	7	**8**
Кремний (Si)	ASTM D5185–18	5	7	7	8	**9**
Титан ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Ванадий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Содержание серы (S),%m	ASTM D4294–10	0.0740	0.0721	0.0707	0.0691	**0.0673**
Состояние масла						
Температура вспышки в открытом тигле, °C	ASTM D92–18	216	214	214	214	**210**
Вязкость при 40°C cSt	ASTM D445–06	54.95	53.44	52.31	50.93	**49.24**
Вязкость при 100°C cSt	ASTM D445–06	9.72	9.45	9.28	9.05	**8.78**
Индекс вязкости	ASTM D2270–10	164	161	161	160	**159**
Общее кислотное число мгKOH/г	ASTM D664–18	1.13	1.28	1.54	1.85	**1.97**
Коррозия медной пластинки	ASTM D130–10	1a	1a	1a	1a	**1a**
Плотность при 15°C kg/m³	ASTM D4052-22	837.1	837.7	838.5	838.9	**840.1**
Присадки						
Фосфор (P)	ASTM D5185–18	264	247	231	220	**217**
Цинк (Zn)	ASTM D5185–18	12	11	10	8	**5**
Кальций (Ca)	ASTM D5185–18	100	90	79	61	**51**
Барий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Магний ppm	ASTM D5185–18	5	5	4	4	**4**
Молибден ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Бор (B)	ASTM D5185–18	103	101	100	98	**96**

Ведущий инженер /_____/ А.Л.Погорелова



РЕЗУЛЬТАТЫ

Заказ		11	12	13
Тип масла		Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM
Образец		31705158	32703176	**31205142**
Отбор/Замена масла		Отбор	Отбор	**Отбор**
Дата отбора		19/08/2024	24/10/2024	**29/12/2024**
Дата получения		22/08/2024	28/10/2024	**09/01/2025**
Дата выдачи заключения		26/08/2024	31/10/2024	**14/01/2025**
Срок службы масла (км)		150000	165000	**180000**
Долив масла (л)		0.5	0.5	**0.5**
Описание узла/механизма		ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	**ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)**
Инвентарный номер		2301	2301	**2301**
Индикаторы износа				
Алюминий (Al)	ASTM D5185–18	39	44	**47**
Железо (Fe)	ASTM D5185–18	132	181	**227**
Хром	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Медь (Cu)	ASTM D5185–18	35	35	**37**
Свинец	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Олово	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Серебро ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Никель ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Содержание осадка %m	ASTM D473–22	0.0203	0.0292	**0.0390**
Температура застывания, °C	ГОСТ 20287–91 Б	-60	-60	**-60**
Марганец ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Загрязнение				
Содержание воды %	ASTM D6304–07	0.194	0.245	**0.295**
Калий ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Натрий (Na)	ASTM D5185–18	8	9	**10**
Кремний (Si)	ASTM D5185–18	10	11	**13**
Титан ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Ванадий ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Содержание серы (S),%m	ASTM D4294–10	0.0651	0.0633	**0.0573**
Состояние масла				
Температура вспышки в открытом тигле, °C	ASTM D92–18	207	201	**194**
Вязкость при 40°C cSt	ASTM D445–06	46.35	38.35	**31.24**
Вязкость при 100°C cSt	ASTM D445–06	8.36	7.23	**5.99**
Индекс вязкости	ASTM D2270–10	158	155	**141**
Общее кислотное число мгKOH/г	ASTM D664–18	2.29	2.68	**3.07**
Коррозия медной пластинки	ASTM D130–10	1a	1b	**1b**
Плотность при 15°C kg/m³	ASTM D4052-22	842.4	843.8	**844.9**
Присадки				
Фосфор (P)	ASTM D5185–18	211	195	**177**
Цинк (Zn)	ASTM D5185–18	3	0	**0**
Кальций (Ca)	ASTM D5185–18	41	29	**23**
Барий ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Магний ppm	ASTM D5185–18	3	2	**0**
Молибден ppm	ASTM D5185–18	0	0	
Бор (B)	ASTM D5185–18	91	89	**87**

Ведущий инженер /_____/ А.Л.Погорелова

Акционерное общество ОГРН 1027739372182 "СЖС Восток Лимитед" Испытательный центр SGS 1 "SGS Vostok Limited" * МОСКВА *

РЕЗУЛЬТАТЫ

Заказ		1	2	3	4	5
Тип масла		Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM
Образец		31207121	31208683	32209624	31506124	**31708914**
Отбор/Замена масла		Отбор	Отбор	Отбор	Отбор	**Отбор**
Дата отбора		06/10/2023	03/01/2023	10/03/2023	15/05/2023	**20/07/2023**
Дата получения		19/10/2023	13/01/2023	13/03/2023	18/05/2023	**24/07/2023**
Дата выдачи заключения		23/10/2023	17/01/2023	17/03/2023	22/05/2023	**28/07/2023**
Срок службы масла (км)		0	15000	30000	45000	**60000**
Долив масла (л)		0	0.5	0.5	0.5	**0.5**
Описание узла/механизма		-	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)
Инвентарный номер		-	2401	2401	2401	**2401**
Индикаторы износа						
Алюминий (Al)	ASTM D5185–18	0	5	9	11	15
Железо (Fe)	ASTM D5185–18	0	16	33	43	63
Хром	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Медь (Cu)	ASTM D5185–18	0	1	6	10	15
Свинец	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Олово	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Серебро ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Никель ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Содержание осадка %m	ASTM D473–22	0.00	0.0015	0.0028	0.0031	0.0092
Температура застывания, °C	ГОСТ 20287–91 Б	-56	-49	-51	-53	-56
Марганец ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Загрязнение						
Содержание воды %	ASTM D6304–07	0.014	0.041	0.087	0.089	0.091
Калий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Натрий (Na)	ASTM D5185–18	0	0	0	3	5
Кремний (Si)	ASTM D5185–18	0	0	0	0	4
Титан ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Ванадий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Содержание серы (S),%m	ASTM D4294–10	0.0820	0.0752	0.0741	0.0738	0.0736
Состояние масла						
Температура вспышки в открытом тигле, °C	ASTM D92–18	232	232	231	229	228
Вязкость при 40°C cSt	ASTM D445–06	56.46	56.32	56.13	55.96	55.37
Вязкость при 100°C cSt	ASTM D445–06	10.12	10.03	9.98	9.91	9.83
Индекс вязкости	ASTM D2270–10	169	167	166	165	165
Общее кислотное число мгKOH/г	ASTM D664–18	0.74	0.58	0.49	0.56	0.85
Коррозия медной пластинки	ASTM D130–10	1a	1a	1a	1a	1a
Плотность при 15°C kg/m³	ASTM D4052-22	838.5	837.5	836.9	836.1	835.7
Присадки						
Фосфор (P)	ASTM D5185–18	300	298	293	293	288
Цинк (Zn)	ASTM D5185–18	20	20	19	18	13
Кальций (Ca)	ASTM D5185–18	120	119	117	113	110
Барий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Магний ppm	ASTM D5185–18	5	5	5	5	5
Молибден ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	0
Бор (B)	ASTM D5185–18	110	108	107	106	103

Ведущий инженер / _____ / А.Л.Погорелова

Акционерное общество ОГРН 1027739317182 "СЖС Восток Лимитед" Испытательный центр SGS 1 "SGS Vostok Limited" МОСКВА

РЕЗУЛЬТАТЫ

Заказ		6	7	8	9	10
Тип масла		Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM
Образец		32204926	32205284	32209630	31708479	**32703532**
Отбор/Замена масла		Отбор	Отбор	Отбор	Отбор	**Отбор**
Дата отбора		24/09/2023	29/11/2023	03/02/2024	09/04/2024	**14/06/2024**
Дата получения		27/09/2023	04/12/2023	06/02/2024	12/04/2024	**17/06/2024**
Дата выдачи заключения		02/10/2023	07/12/2023	12/02/2024	16/04/2024	**21/06/2024**
Срок службы масла (км)		75000	90000	105000	120000	**135000**
Долив масла (л)		0.5	0.5	0.5	0.5	**0.5**
Описание узла/механизма		ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	**ГМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)**
Инвентарный номер		2401	2401	2401	2401	**2401**
Индикаторы износа						
Алюминий (Al)	ASTM D5185–18	15	19	26	30	**37**
Железо (Fe)	ASTM D5185–18	73	80	90	101	**116**
Хром	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Медь (Cu)	ASTM D5185–18	17	21	24	29	**35**
Свинец	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Олово	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Серебро ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Никель ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Содержание осадка %m	ASTM D473–22	0.01	0.0124	0.0154	0.0166	**0.0173**
Температура застывания, °C	ГОСТ 20287–91 Б	-57	-58	-59	-60	**-60**
Марганец ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Загрязнение						
Содержание воды %	ASTM D6304–07	0.108	0.115	0.129	0.139	**0.160**
Калий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Натрий (Na)	ASTM D5185–18	5	5	6	7	**7**
Кремний (Si)	ASTM D5185–18	5	6	8	8	**10**
Титан ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Ванадий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Содержание серы (S),%m	ASTM D4294–10	0.0715	0.0709	0.0697	0.0653	**0.0625**
Состояние масла						
Температура вспышки в открытом тигле, °C	ASTM D92–18	218	217	212	210	**209**
Вязкость при 40°C cSt	ASTM D445–06	54.83	51.84	49.97	46.98	**43.21**
Вязкость при 100°C cSt	ASTM D445–06	9.67	9.15	8.85	8.36	**7.87**
Индекс вязкости	ASTM D2270–10	163	159	158	155	**147**
Общее кислотное число мгKOH/г	ASTM D664–18	1.01	1.12	1.45	1.86	**2.00**
Коррозия медной пластинки	ASTM D130–10	1a	1a	1a	1a	**1a**
Плотность при 15°C kg/m³	ASTM D4052-22	835.8	835.9	836.3	837.3	**838.6**
Присадки						
Фосфор (P)	ASTM D5185–18	268	251	243	227	**221**
Цинк (Zn)	ASTM D5185–18	11	8	7	5	**3**
Кальций (Ca)	ASTM D5185–18	103	91	80	71	**62**
Барий ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Магний ppm	ASTM D5185–18	5	4	4	3	**3**
Молибден ppm	ASTM D5185–18	0	0	0	0	**0**
Бор (B)	ASTM D5185–18	100	98	97	94	**91**

Ведущий инженер /_____/ А.Л.Погорелова

Акционерное общество ОГРН 1027739312182 "СЖС Восток Лимитед" испытательный центр SGS 1 "SGS Vostok Limited" * МОСКВА *

РЕЗУЛЬТАТЫ

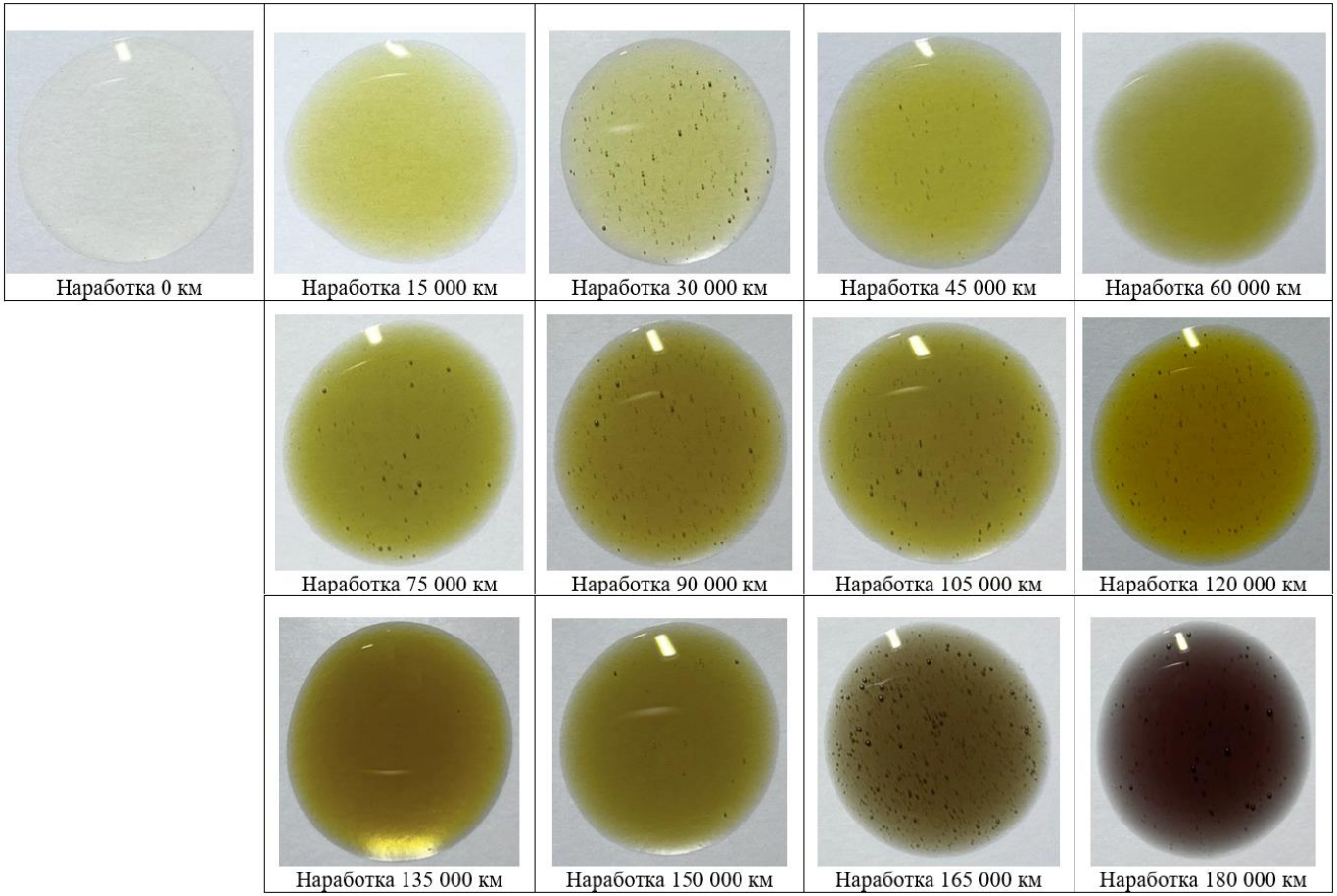
Заказ		11	12	13
Тип масла		Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM	Shell Spirax S6 ATF ZM
Образец		31705160	32703178	**31205144**
Отбор/Замена масла		Отбор	Отбор	**Отбор**
Дата отбора		19/08/2024	24/10/2024	**29/12/2024**
Дата получения		22/08/2024	28/10/2024	**09/01/2025**
Дата выдачи заключения		26/08/2024	31/10/2024	**14/01/2025**
Срок службы масла (км)		150000	165000	**180000**
Долив масла (л)		0.5	0.5	**0.5**
Описание узла/механизма		ПМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	ПМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)	**ПМКП ZF ECOLIFE 1 (6AP1700B)**
Инвентарный номер		2401	2401	**2401**
Индикаторы износа				
Алюминий (Al)	ASTM D5185–18	44	48	**52**
Железо (Fe)	ASTM D5185–18	141	197	**241**
Хром	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Медь (Cu)	ASTM D5185–18	38	39	**40**
Свинец	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Олово	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Серебро ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Никель ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Содержание осадка %m	ASTM D473–22	0.0223	0.0346	**0.043**
Температура застывания, °C	ГОСТ 20287–91 Б	-60	-60	**-60**
Марганец ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Загрязнение				
Содержание воды %	ASTM D6304–07	0.213	0.267	**0.317**
Калий ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Натрий (Na)	ASTM D5185–18	8	10	**11**
Кремний (Si)	ASTM D5185–18	12	14	**16**
Титан ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Ванадий ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Содержание серы (S),%m	ASTM D4294–10	0.0612	0.0595	**0.0504**
Состояние масла				
Температура вспышки в открытом тигле, °C	ASTM D92–18	206	194	**190**
Вязкость при 40°C cSt	ASTM D445–06	37.88	31.58	**27.29**
Вязкость при 100°C cSt	ASTM D445–06	6.92	6.11	**5.23**
Индекс вязкости	ASTM D2270–10	144	145	**125**
Общее кислотное число мгKOH/г	ASTM D664–18	2.52	3.03	**3.64**
Коррозия медной пластинки	ASTM D130–10	1b	1b	**1b**
Плотность при 15°C kg/m³	ASTM D4052-22	839.4	840.4	**842.4**
Присадки				
Фосфор (P)	ASTM D5185–18	207	187	**165**
Цинк (Zn)	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Кальций (Ca)	ASTM D5185–18	53	38	**25**
Барий ppm	ASTM D5185–18	0	0	**0**
Магний ppm	ASTM D5185–18	2	1	**0**
Молибден ppm	ASTM D5185–18	0	0	
Бор (B)	ASTM D5185–18	89	88	**84**

Ведущий инженер /_____/ А.Л.Погорелова

Акционерное общество "СЖС Восток Лимитед" ОГРН 1027739317182 Испытательный центр SGS 1 "SGS Vostok Limited" * МОСКВА *

ПРИЛОЖЕНИЕ Т

Внешнее изменение СМ в процессе испытаний



ПРИЛОЖЕНИЕ У

Матрица планирования и результаты ПФЭ триботехнических исследований

Схема типа сопряжения пар трения: «Ролик – Колодка»

Образец: «Колодка (часть фрикционного диска) – Проба СМ»

Вращающийся элемент: Ролик из стали 45

Диаметр ролика: 50 мм

Наименование тех. жидкости	Наработка, км (Состояние СМ)	Номер опыта	Кодир.упр. факторов			Экспериментальные результаты																				
						Гаражный номер подконтрольного автобуса: 2300							Гаражный номер подконтрольного автобуса: 2301							Гаражный номер подконтрольного автобуса: 2401						
						Момента трения, M_T, Н·мм серии параллельных опытов			Линейный износ, $И$, мкм серии параллельных опытов			$\bar{t}_{трения}$, °С	Момента трения, M_T, Н·мм серии параллельных опытов			Линейный износ, $И$, мкм серии параллельных опытов			$\bar{t}_{трения}$, °С	Момента трения, M_T, Н·мм серии параллельных опытов			Линейный износ, $И$, мкм серии параллельных опытов			$\bar{t}_{трения}$, °С
			X_0	X_1	X_2	1	2	3	1	2	3		1	2	3	1	2	3		1	2	3	1	2	3	
Смазочный материал для ГМКП – Shell Spirax S6 ATF ZM	0	1	+1	-1	-1	625	630	630	190	192	191	65	620	625	625	188	190	189	60	630	635	635	192	194	193	65
		2	+1	-1	+1	670	655	660	193	195	194		665	650	655	191	193	192		675	660	665	195	197	196	
		3	+1	+1	-1	650	640	650	197	198	200		645	635	645	195	196	198		655	645	655	199	200	202	
		4	+1	+1	+1	655	670	660	200	204	205		650	665	655	198	202	203		660	675	665	202	206	207	
	15000	1	+1	-1	-1	650	655	650	210	212	210	65	645	650	645	208	210	208	60	655	660	655	212	214	212	65
		2	+1	-1	+1	685	680	690	212	214	213		680	675	685	210	212	211		690	685	695	214	216	215	
		3	+1	+1	-1	660	660	665	215	216	214		655	655	660	213	214	212		665	665	670	217	218	216	
		4	+1	+1	+1	705	705	700	216	218	217		700	700	695	214	216	215		710	710	705	218	220	219	
	30000	1	+1	-1	-1	695	700	690	226	225	224	70	690	695	685	224	223	222	65	700	705	695	228	227	226	70
		2	+1	-1	+1	715	720	725	227	226	225		710	715	720	225	224	223		720	725	730	229	228	227	
		3	+1	+1	-1	705	710	710	231	230	229		700	705	705	229	228	227		710	715	715	233	232	231	
		4	+1	+1	+1	720	730	730	233	232	231		715	725	725	231	230	229		725	735	735	235	234	233	
	45000	1	+1	-1	-1	710	715	710	252	251	252	70	705	710	705	250	249	250	65	715	720	715	254	253	254	70
		2	+1	-1	+1	740	740	745	253	252	254		735	735	740	251	250	252		745	745	750	255	254	256	
		3	+1	+1	-1	720	725	725	255	253	255		715	720	720	253	251	253		725	730	730	257	255	257	
		4	+1	+1	+1	750	760	750	256	255	257		745	755	745	254	253	255		755	765	755	258	257	259	
	60000	1	+1	-1	-1	755	750	745	267	266	268	75	750	745	740	265	264	266	70	760	755	750	269	268	270	75
		2	+1	-1	+1	770	775	780	269	267	269		765	770	775	267	265	267		775	780	785	271	269	271	
		3	+1	+1	-1	765	765	765	270	269	271		760	760	760	268	267	269		770	770	770	272	271	273	
		4	+1	+1	+1	780	805	795	271	270	272		775	800	790	269	268	270		785	810	800	273	272	274	
	75000	1	+1	-1	-1	775	785	780	283	289	285	80	770	780	775	281	287	283	75	780	790	785	285	291	287	80
		2	+1	-1	+1	795	810	815	284	290	286		790	805	810	282	288	284		800	815	820	286	292	288	
		3	+1	+1	-1	780	805	805	286	291	288		775	800	800	284	289	286		785	810	810	288	293	290	
		4	+1	+1	+1	805	850	840	287	292	289		800	845	835	285	290	287		810	855	845	289	294	291	
	90000	1	+1	-1	-1	800	820	815	315	320	317	85	795	815	810	313	318	315	80	805	825	820	317	322	319	85
		2	+1	-1	+1	850	845	850	316	321	318		845	840	845	314	319	316		855	850	855	318	323	320	
		3	+1	+1	-1	830	845	845	320	322	320		825	840	840	318	320	318		835	850	850	322	324	322	
		4	+1	+1	+1	880	895	885	321	323	321		875	890	880	319	321	319		885	900	890	323	325	323	

Наименование тех. жидкости	Наработка, км (Состояние СМ)	Номер опыта	Кодированные управляемые факторов			Экспериментальные результаты																				
						Гаражный номер подконтрольного автобуса: 2300							Гаражный номер подконтрольного автобуса: 2301							Гаражный номер подконтрольного автобуса: 2401						
						Момента трения, M_T, Н·мм серии параллельных опытов			Линейный износ, $И$, мкм серии параллельных опытов			$\bar{t}_{трения}$, °С	Момента трения, M_T, Н·мм серии параллельных опытов			Линейный износ, $И$, мкм серии параллельных опытов			$\bar{t}_{трения}$, °С	Момента трения, M_T, Н·мм серии параллельных опытов			Линейный износ, $И$, мкм серии параллельных опытов			$\bar{t}_{трения}$, °С
			X_0	X_1	X_2	1	2	3	1	2	3		1	2	3	1	2	3		1	2	3	1	2	3	
Смазочный материал для ГМКП – Shell Spirax S6 ATF ZM	105000	1	+1	-1	-1	875	855	850	352	361	355	87	870	850	845	350	359	353	82	880	860	855	354	363	357	87
		2	+1	-1	+1	915	880	885	354	362	356		910	875	880	352	360	354		920	885	890	356	364	358	
		3	+1	+1	-1	900	885	885	355	364	358		895	880	880	353	362	356		905	890	890	357	366	360	
		4	+1	+1	+1	955	940	930	356	365	359		950	935	925	354	363	357		960	945	935	358	367	361	
	120000	1	+1	-1	-1	885	890	885	397	394	400	90	880	885	880	395	392	398	85	890	895	890	399	396	402	90
		2	+1	-1	+1	935	915	920	398	395	401		930	910	915	396	393	399		940	920	925	400	397	403	
		3	+1	+1	-1	925	925	925	399	397	403		920	920	920	397	395	401		930	930	930	401	399	405	
		4	+1	+1	+1	960	985	975	401	399	404		955	980	970	399	397	402		965	990	980	403	401	406	
	135000	1	+1	-1	-1	890	925	920	494	501	507	95	885	920	915	492	499	505	90	895	930	925	496	503	509	95
		2	+1	-1	+1	950	950	955	495	502	508		945	945	950	493	500	506		955	955	960	497	504	510	
		3	+1	+1	-1	940	965	965	500	504	510		935	960	960	498	502	508		945	970	970	502	506	512	
		4	+1	+1	+1	980	1030	1020	505	505	511		975	1025	1015	503	503	509		985	1035	1025	507	507	513	
	150000	1	+1	-1	-1	920	960	955	554	560	552	95	915	955	950	552	558	550	90	925	965	960	556	562	554	100
		2	+1	-1	+1	985	985	990	555	561	553		980	980	985	553	559	551		990	990	995	557	563	555	
		3	+1	+1	-1	970	1005	1005	557	563	554		965	1000	1000	555	561	552		975	1010	1010	559	565	556	
		4	+1	+1	+1	1010	1075	1065	558	565	556		1005	1070	1060	556	563	554		1015	1080	1070	560	567	558	
	165000	1	+1	-1	-1	1015	995	990	673	669	675	98	1010	990	985	671	667	673	93	1020	1000	995	675	671	677	100
		2	+1	-1	+1	1065	1020	1025	674	671	676		1060	1015	1020	672	669	674		1070	1025	1030	676	673	678	
		3	+1	+1	-1	1050	1045	1045	676	672	678		1045	1040	1040	674	670	676		1055	1050	1050	678	674	680	
		4	+1	+1	+1	1090	1120	1110	678	674	679		1085	1115	1105	676	672	677		1095	1125	1115	680	676	681	
	180000	1	+1	-1	-1	1050	1030	1025	785	783	779	105	1045	1025	1020	783	781	777	100	1055	1035	1030	787	785	781	110
		2	+1	-1	+1	1100	1055	1060	789	791	788		1095	1050	1055	787	789	786		1105	1060	1065	791	793	790	
		3	+1	+1	-1	1120	1085	1085	797	795	792		1115	1080	1080	795	793	790		1125	1090	1090	799	797	794	
		4	+1	+1	+1	1170	1165	1155	803	800	801		1165	1160	1150	801	798	799		1175	1170	1160	805	802	803	

Средний коэффициент вариации: Момента трения – 1,1%

Средний коэффициент вариации: Линейного износа – 0,7%

Средний коэффициент вариации: Температуры трения – 4%

ПРИЛОЖЕНИЕ Ф

Результаты расчетных оценочных показателей ПФЭ

Наименование тех. жидкости	Наработка, км	Номер опыта	Расчётные оценочные показатели эксперимента																	
			Гаражный номер подконтрольного автобуса: 2300						Гаражный номер подконтрольного автобуса: 2301						Гаражный номер подконтрольного автобуса: 2401					
			Коэффициент трения, f_T, серии параллельных опытов			Интенсивность изнашивания, I_H, мкм/км серии параллельных опытов			Коэффициент трения, f_T, серии параллельных опытов			Интенсивность изнашивания, I_H, мкм/км серии параллельных опытов			Коэффициент трения, f_T, серии параллельных опытов			Интенсивность изнашивания, f_T, мкм/км серии параллельных опытов		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Смазочный материал для ГМКП – Shell Spirax S6 ATF ZM	0	1	0,00689	0,00694	0,00694	1,27	1,28	1,27	0,00683	0,00689	0,00689	1,25	1,27	1,26	0,00694	0,00700	0,00700	1,28	1,29	1,29
		2	0,00610	0,00597	0,00601	1,29	1,30	1,29	0,00606	0,00592	0,00597	1,27	1,29	1,28	0,00615	0,00601	0,00606	1,30	1,31	1,31
		3	0,00716	0,00705	0,00716	1,31	1,32	1,33	0,00711	0,00700	0,00711	1,30	1,31	1,32	0,00722	0,00711	0,00722	1,33	1,33	1,35
		4	0,00597	0,00610	0,00601	1,33	1,36	1,37	0,00592	0,00606	0,00597	1,32	1,35	1,35	0,00601	0,00615	0,00606	1,35	1,37	1,38
	15000	1	0,00716	0,00722	0,00716	1,40	1,41	1,40	0,00711	0,00716	0,00711	1,39	1,40	1,39	0,00722	0,00727	0,00722	1,41	1,43	1,41
		2	0,00624	0,00620	0,00629	1,41	1,43	1,42	0,00620	0,00615	0,00624	1,40	1,41	1,41	0,00629	0,00624	0,00633	1,43	1,44	1,43
		3	0,00727	0,00727	0,00733	1,43	1,44	1,43	0,00722	0,00722	0,00727	1,42	1,43	1,41	0,00733	0,00733	0,00738	1,45	1,45	1,44
		4	0,00642	0,00642	0,00638	1,44	1,45	1,45	0,00638	0,00638	0,00633	1,43	1,44	1,43	0,00647	0,00647	0,00642	1,45	1,47	1,46
	30000	1	0,00766	0,00771	0,00760	1,51	1,50	1,49	0,00760	0,00766	0,00755	1,49	1,49	1,48	0,00771	0,00777	0,00766	1,52	1,51	1,51
		2	0,00651	0,00656	0,00661	1,51	1,51	1,50	0,00647	0,00651	0,00656	1,50	1,49	1,49	0,00656	0,00661	0,00665	1,53	1,52	1,51
		3	0,00777	0,00782	0,00782	1,54	1,53	1,53	0,00771	0,00777	0,00777	1,53	1,52	1,51	0,00782	0,00788	0,00788	1,55	1,55	1,54
		4	0,00656	0,00665	0,00665	1,55	1,55	1,54	0,00651	0,00661	0,00661	1,54	1,53	1,53	0,00661	0,00670	0,00670	1,57	1,56	1,55
	45000	1	0,00782	0,00788	0,00782	1,68	1,67	1,68	0,00777	0,00782	0,00777	1,67	1,66	1,67	0,00788	0,00793	0,00788	1,69	1,69	1,69
		2	0,00674	0,00674	0,00679	1,69	1,68	1,69	0,00670	0,00670	0,00674	1,67	1,67	1,68	0,00679	0,00679	0,00683	1,70	1,69	1,71
		3	0,00793	0,00799	0,00799	1,70	1,69	1,70	0,00788	0,00793	0,00793	1,69	1,67	1,69	0,00799	0,00804	0,00804	1,71	1,70	1,71
		4	0,00683	0,00692	0,00683	1,71	1,70	1,71	0,00679	0,00688	0,00679	1,69	1,69	1,70	0,00688	0,00697	0,00688	1,72	1,71	1,73
	60000	1	0,00832	0,00826	0,00821	1,78	1,77	1,79	0,00826	0,00821	0,00815	1,77	1,76	1,77	0,00837	0,00832	0,00826	1,79	1,79	1,80
		2	0,00702	0,00706	0,00711	1,79	1,78	1,79	0,00697	0,00702	0,00706	1,78	1,77	1,78	0,00706	0,00711	0,00715	1,81	1,79	1,81
		3	0,00843	0,00843	0,00843	1,80	1,79	1,81	0,00837	0,00837	0,00837	1,79	1,78	1,79	0,00848	0,00848	0,00848	1,81	1,81	1,82
		4	0,00711	0,00733	0,00724	1,81	1,80	1,81	0,00706	0,00729	0,00720	1,79	1,79	1,80	0,00715	0,00738	0,00729	1,82	1,81	1,83
	75000	1	0,00854	0,00865	0,00860	1,89	1,93	1,90	0,00848	0,00860	0,00854	1,87	1,91	1,89	0,00860	0,00871	0,00865	1,90	1,94	1,91
		2	0,00724	0,00738	0,00743	1,89	1,93	1,91	0,00720	0,00733	0,00738	1,88	1,92	1,89	0,00729	0,00743	0,00747	1,91	1,95	1,92
		3	0,00860	0,00887	0,00887	1,91	1,94	1,92	0,00854	0,00882	0,00882	1,89	1,93	1,91	0,00865	0,00893	0,00893	1,92	1,95	1,93
		4	0,00733	0,00774	0,00765	1,91	1,95	1,93	0,00729	0,00770	0,00761	1,90	1,93	1,91	0,00738	0,00779	0,00770	1,93	1,96	1,94
	90000	1	0,00882	0,00904	0,00898	2,10	2,13	2,11	0,00876	0,00898	0,00893	2,09	2,12	2,10	0,00887	0,00909	0,00904	2,11	2,15	2,13
		2	0,00774	0,00770	0,00774	2,11	2,14	2,12	0,00770	0,00765	0,00770	2,09	2,13	2,11	0,00779	0,00774	0,00779	2,12	2,15	2,13
		3	0,00915	0,00931	0,00931	2,13	2,15	2,13	0,00909	0,00926	0,00926	2,12	2,13	2,12	0,00920	0,00937	0,00937	2,15	2,16	2,15
		4	0,00802	0,00815	0,00806	2,14	2,15	2,14	0,00797	0,00811	0,00802	2,13	2,14	2,13	0,00806	0,00820	0,00811	2,15	2,17	2,15

Наименование тех. жидкости	Наработка, км	Номер опыта	Расчётные оценочные показатели эксперимента																	
			Гаражный номер подконтрольного автобуса: 2300						Гаражный номер подконтрольного автобуса: 2301						Гаражный номер подконтрольного автобуса: 2401					
			Коэффициент трения, f_T, серии параллельных опытов			Интенсивность изнашивания, $I_И$, мкм/км серии параллельных опытов			Коэффициент трения, f_T, серии параллельных опытов			Интенсивность изнашивания, $I_И$, мкм/км серии параллельных опытов			Коэффициент трения, f_T, серии параллельных опытов			Интенсивность изнашивания, $I_И$, мкм/км серии параллельных опытов		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Смазочный материал для ГМКП – Shell Spirax S6 ATF ZM	105000	1	0,00964	0,00942	0,00937	2,35	2,41	2,37	0,00959	0,00937	0,00931	2,33	2,39	2,35	0,00970	0,00948	0,00942	2,36	2,42	2,38
		2	0,00834	0,00802	0,00806	2,36	2,41	2,37	0,00829	0,00797	0,00802	2,35	2,40	2,36	0,00838	0,00806	0,00811	2,37	2,43	2,39
		3	0,00992	0,00975	0,00975	2,37	2,43	2,39	0,00986	0,00970	0,00970	2,35	2,41	2,37	0,00997	0,00981	0,00981	2,38	2,44	2,40
		4	0,00870	0,00856	0,00847	2,37	2,43	2,39	0,00866	0,00852	0,00843	2,36	2,42	2,38	0,00875	0,00861	0,00852	2,39	2,45	2,41
	120000	1	0,00975	0,00981	0,00975	2,65	2,63	2,67	0,00970	0,00975	0,00970	2,63	2,61	2,65	0,00981	0,00986	0,00981	2,66	2,64	2,68
		2	0,00852	0,00834	0,00838	2,65	2,63	2,67	0,00847	0,00829	0,00834	2,64	2,62	2,66	0,00856	0,00838	0,00843	2,67	2,65	2,69
		3	0,01019	0,01019	0,01019	2,66	2,65	2,69	0,01014	0,01014	0,01014	2,65	2,63	2,67	0,01025	0,01025	0,01025	2,67	2,66	2,70
		4	0,00875	0,00897	0,00888	2,67	2,66	2,69	0,00870	0,00893	0,00884	2,66	2,65	2,68	0,00879	0,00902	0,00893	2,69	2,67	2,71
	135000	1	0,00981	0,01019	0,01014	3,29	3,34	3,38	0,00975	0,01014	0,01008	3,28	3,33	3,37	0,00986	0,01025	0,01019	3,31	3,35	3,39
		2	0,00866	0,00866	0,00870	3,30	3,35	3,39	0,00861	0,00861	0,00866	3,29	3,33	3,37	0,00870	0,00870	0,00875	3,31	3,36	3,40
		3	0,01036	0,01063	0,01063	3,33	3,36	3,40	0,01030	0,01058	0,01058	3,32	3,35	3,39	0,01041	0,01069	0,01069	3,35	3,37	3,41
		4	0,00893	0,00938	0,00929	3,37	3,37	3,41	0,00888	0,00934	0,00925	3,35	3,35	3,39	0,00897	0,00943	0,00934	3,38	3,38	3,42
	150000	1	0,01014	0,01058	0,01052	3,69	3,73	3,68	0,01008	0,01052	0,01047	3,68	3,72	3,67	0,01019	0,01063	0,01058	3,71	3,75	3,69
		2	0,00897	0,00897	0,00902	3,70	3,74	3,69	0,00893	0,00893	0,00897	3,69	3,73	3,67	0,00902	0,00902	0,00907	3,71	3,75	3,70
		3	0,01069	0,01107	0,01107	3,71	3,75	3,69	0,01063	0,01102	0,01102	3,70	3,74	3,68	0,01074	0,01113	0,01113	3,73	3,77	3,71
		4	0,00920	0,00979	0,00970	3,72	3,77	3,71	0,00916	0,00975	0,00966	3,71	3,75	3,69	0,00925	0,00984	0,00975	3,73	3,78	3,72
	165000	1	0,01118	0,01096	0,01091	4,49	4,46	4,50	0,01113	0,01091	0,01085	4,47	4,45	4,49	0,01124	0,01102	0,01096	4,50	4,47	4,51
		2	0,00970	0,00929	0,00934	4,49	4,47	4,51	0,00966	0,00925	0,00929	4,48	4,46	4,49	0,00975	0,00934	0,00938	4,51	4,49	4,52
		3	0,01157	0,01152	0,01152	4,51	4,48	4,52	0,01152	0,01146	0,01146	4,49	4,47	4,51	0,01163	0,01157	0,01157	4,52	4,49	4,53
		4	0,00993	0,01021	0,01011	4,52	4,49	4,53	0,00989	0,01016	0,01007	4,51	4,48	4,51	0,00998	0,01025	0,01016	4,53	4,51	4,54
	180000	1	0,01157	0,01135	0,01129	5,23	5,22	5,19	0,01152	0,01129	0,01124	5,22	5,21	5,18	0,01163	0,01140	0,01135	5,25	5,23	5,21
		2	0,01002	0,00961	0,00966	5,26	5,27	5,25	0,00998	0,00957	0,00961	5,25	5,26	5,24	0,01007	0,00966	0,00970	5,27	5,29	5,27
		3	0,01234	0,01196	0,01196	5,31	5,30	5,28	0,01229	0,01190	0,01190	5,30	5,29	5,27	0,01240	0,01201	0,01201	5,33	5,31	5,29
		4	0,01066	0,01062	0,01052	5,35	5,33	5,34	0,01062	0,01057	0,01048	5,34	5,32	5,33	0,01071	0,01066	0,01057	5,37	5,35	5,35

ПРИЛОЖЕНИЕ Х

Результаты регрессионного анализа изменения коэффициента трения

Наработка, км	Номер опыта	Кодированное значение варьируемых- управляемых факторов				Выходной параметр эксперимента (k_T)			$\bar{\bar{\bar{y}}}_i'$	S^2	$S_в^2$	$S\{b_k\}$	$S_{ад}^2$	$\bar{\bar{\bar{\bar{y}}}}'$	$\hat{y}_i$	$\bar{\hat{y}}_i$
		x_0	x_1	x_2	x_1x_2	$\bar{\bar{\bar{y}}}_{2300}$	$\bar{\bar{\bar{y}}}_{2301}$	$\bar{\bar{\bar{y}}}_{2401}$								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	1	1	-1	-1	1	0,00692	0,00687	0,00698	**0,00692**	$3\cdot10^{-9}$	$4{,}7\cdot10^{-9}$	$1{,}9\cdot10^{-5}$	$1\cdot10^{-35}$	0,00653	**0,00702**	0,00653
	2	1	-1	1	-1	0,00603	0,00598	0,00607	**0,00603**	$5{,}2\cdot10^{-9}$					**0,00603**	
	3	1	1	-1	-1	0,00713	0,00707	0,00718	**0,00713**	$5{,}3\cdot10^{-9}$					**0,00702**	
	4	1	1	1	1	0,00603	0,00598	0,00607	**0,00603**	$5{,}2\cdot10^{-9}$					**0,00603**	
	r_{xyi}	–	0,10	-0,989	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,2837; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.						Условие адекватности ($0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	0,00653	0,00005	-0,005	-0,00005											
	$t_{табл}$=2,31 t_k расч	330,5	1,6	25,2	1,6	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Нз.	Зн.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель	$\hat{y} = 6{,}5\cdot10^{-3} - 5\cdot10^{-4}\cdot x_2$				2;8	$2{,}2\cdot10^{-27}$	4,46	–	Адекватна	**0,81**	**0,72**			**97,9**	
	Натуральная мат. модель	$\hat{y} = 0{,}0118 - 1{,}3\cdot10^{-6}\cdot x_2$				2;8	–	4,46	97,2	Адекватна						
15 000	1	1	-1	-1	1	0,00718	0,00713	0,00724	**0,00718**	$3\cdot10^{-9}$	$2{,}8\cdot10^{-9}$	$1{,}5\cdot10^{-5}$	$4{,}5\cdot10^{-36}$	0,00678	**0,00724**	0,00678
	2	1	-1	1	-1	0,00624	0,00620	0,00629	**0,00624**	$3{,}1\cdot10^{-9}$					**0,00632**	
	3	1	1	-1	-1	0,00729	0,00724	0,00735	**0,00729**	$3\cdot10^{-9}$					**0,00724**	
	4	1	1	1	1	0,00641	0,00636	0,00645	**0,00641**	$2{,}1\cdot10^{-9}$					**0,00632**	
	r_{xyi}	–	0,15	-0,988	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,2765; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.						Условие адекватности ($0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	0,00678	0,00007	-0,00046	0,00001											
	$t_{табл}$=2,31 t_k расч	442,7	1,5	29,7	0,9	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Нз.	Зн.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель	$\hat{y} = 6{,}8\cdot10^{-3} - 4{,}6\cdot10^{-4}\cdot x_2$				2;8	$1{,}6\cdot10^{-27}$	4,46	–	Адекватна	**0,71**	**1,04**			**97,6**	
	Натуральная мат. модель	$\hat{y} = 0{,}0116 - 1{,}2\cdot10^{-6}\cdot x_2$				2;8	–	4,46	82,9	Адекватна						

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
30 000	1	1	-1	-1	1	0,00766	0,00760	0,00771	**0,00766**	$4{,}6\cdot10^{-9}$	$3{,}6\cdot10^{-9}$	$1{,}7\cdot10^{-5}$	$1\cdot10^{-35}$	0,00716	**0,00773**	0,00716
	2	1	-1	1	-1	0,00656	0,00651	0,00661	**0,00656**	$3{,}1\cdot10^{-9}$					**0,00659**	
	3	1	1	-1	-1	0,00781	0,00775	0,00786	**0,00781**	$3\cdot10^{-9}$					**0,00773**	
	4	1	1	1	1	0,00662	0,00658	0,00667	**0,00662**	$3{,}6\cdot10^{-9}$					**0,00659**	
	r_{xyi}	–	0,09	-0,995	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,3177; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.					Условие адекватности ($0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	0,00716	0,00005	-0,0057	-0,00005											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	414,4	2	33	2	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Нз.	Зн.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель	$\hat{y} = 7{,}2\cdot10^{-3} - 5{,}7\cdot10^{-4}\cdot x_2$				2;8	$2{,}8\cdot10^{-27}$	4,46	–	Адекватна	**0,84**	**0,71**			**97,6**	
	Натуральная мат. модель	$\hat{y} = 0{,}0132 - 1{,}5\cdot10^{-6}\cdot x_2$				2;8	–	4,46	82,9	Адекватна						
45 000	1	1	-1	-1	1	0,00784	0,00779	0,00790	**0,00784**	$3\cdot10^{-9}$	$2{,}9\cdot10^{-9}$	$1{,}6\cdot10^{-5}$	0	0,00736	**0,00791**	0,00736
	2	1	-1	1	-1	0,00676	0,00671	0,00680	**0,00676**	$2{,}1\cdot10^{-9}$					**0,00681**	
	3	1	1	-1	-1	0,00797	0,00792	0,00803	**0,00797**	$3\cdot10^{-9}$					**0,00791**	
	4	1	1	1	1	0,00686	0,00682	0,00691	**0,00686**	$3{,}6\cdot10^{-9}$					**0,00681**	
	r_{xyi}	–	0,11	-0,994	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности: $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,3084; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.					Условие адекватности ($0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	0,00736	0,00006	-0,00055	0,00006											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	469,7	1,7	35	1,7	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Нз.	Зн.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель	$\hat{y} = 7{,}4\cdot10^{-3} - 5{,}5\cdot10^{-4}\cdot x_2$				2;8	0	4,46	–	Адекватна	**0,79**	**0,80**			**98,9**	
	Натуральная мат. модель	$\hat{y} = 0{,}0131 - 1{,}4\cdot10^{-6}\cdot x_2$				2;8	–	4,46	172,5	Адекватна						
60 000	1	1	-1	-1	1	0,00826	0,00821	0,00832	**0,00826**	$4{,}6\cdot10^{-9}$	$5{,}3\cdot10^{-9}$	$2{,}1\cdot10^{-5}$	$1{,}1\cdot10^{-36}$	0,00775	**0,00835**	0,00775
	2	1	-1	1	-1	0,00706	0,00702	0,00711	**0,00706**	$3{,}1\cdot10^{-9}$					**0,00715**	
	3	1	1	-1	-1	0,00843	0,00837	0,00848	**0,00843**	$2{,}3\cdot10^{-9}$					**0,00835**	
	4	1	1	1	1	0,00723	0,00718	0,00727	**0,00723**	$1{,}1\cdot10^{-8}$					**0,00715**	
	r_{xyi}	–	0,14	-0,991	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,5345; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.					Условие адекватности ($0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	0,00775	0,00008	-0,00060	0,00008											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	367,2	1,9	28,5	1,9	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Нз.	Зн.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель	$\hat{y} = 7{,}8\cdot10^{-3} - 6\cdot10^{-4}\cdot x_2$				2;8	$2{,}1\cdot10^{-28}$	4,46	–	Адекватна	**0,82**	**1,08**			**98,1**	

	Натуральная мат. модель		$\hat{y} = 0{,}0141 - 1{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot x_2$			2;8	–	4,46	104,7	Адекватна						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
75 000	1	1	-1	-1	1	0,00860	0,00854	0,00865	**0,00860**	$4{,}6 \cdot 10^{-9}$	$1{,}8 \cdot 10^{-8}$	$3{,}8 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-35}$	0,00808	**0,00869**	0,00808
	2	1	-1	1	-1	0,00735	0,00730	0,00740	**0,00735**	$8{,}3 \cdot 10^{-9}$					**0,00746**	
	3	1	1	-1	-1	0,00878	0,00872	0,00883	**0,00878**	$2{,}1 \cdot 10^{-8}$					**0,00869**	
	4	1	1	1	1	0,00758	0,00753	0,00762	**0,00758**	$3{,}6 \cdot 10^{-8}$					**0,00746**	
	r_{xyi}	–	0,17	-0,986	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч} < G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,5157; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.						Условие адекватности $(0 \le \Delta_{аппр} < \cdot 10 \div 15)$			Условие качества $(80 \le R^2 \le 100)$	
	b_k	0,00808	0,00010	-0,00061	0,00010											
	$t_{табл}$=2,31 t_k расч	210,8	1,7	16	1,7	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	$\Delta_{аппр}$ (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Нз.	Зн.	Нз.	k_1;k_2	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель		$\hat{y} = 8{,}1 \cdot 10^{-3} - 6{,}1 \cdot 10^{-4} \cdot x_2$			2;8	$5{,}8 \cdot 10^{-28}$	4,46	–	Адекватна	**0,80**	**1,29**			**97,2**	
	Натуральная мат. модель		$\hat{y} = 0{,}0145 - 1{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot x_2$			2;8	–	4,46	69,9	Адекватна						
90 000	1	1	-1	-1	1	0,00894	0,00889	0,00900	**0,00894**	$1{,}2 \cdot 10^{-8}$	$7{,}1 \cdot 10^{-9}$	$2{,}4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-35}$	0,0085	**0,00910**	0,0085
	2	1	-1	1	-1	0,00773	0,00768	0,00778	**0,00773**	$2{,}1 \cdot 10^{-9}$					**0,00790**	
	3	1	1	-1	-1	0,00926	0,00920	0,00931	**0,00926**	$9{,}1 \cdot 10^{-9}$					**0,00910**	
	4	1	1	1	1	0,00808	0,00803	0,00812	**0,00808**	$5{,}2 \cdot 10^{-9}$					**0,00790**	
	r_{xyi}	–	0,27	-0,964	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч} < G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,4259; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.						Условие адекватности $(0 \le \Delta_{аппр} < \cdot 10 \div 15)$			Условие качества $(80 \le R^2 \le 100)$	
	b_k	0,00850	0,00017	-0,00060	0,00017											
	$t_{табл}$=2,31 t_k расч	348,8	2,2	24,5	2,2	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	$\Delta_{аппр}$ (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Нз.	Зн.	Нз.	k_1;k_2	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель		$\hat{y} = 8{,}5 \cdot 10^{-3} - 6 \cdot 10^{-4} \cdot x_2$			2;8	$1{,}4 \cdot 10^{-27}$	4,46	–	Адекватна	**0,74**	**1,96**			**92,9**	
	Натуральная мат. модель		$\hat{y} = 0{,}0148 - 1{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot x_2$			2;8	–	4,46	26,1	Адекватна						
105 000	1	1	-1	-1	1	0,00948	0,00942	0,00953	**0,00948**	$1{,}8 \cdot 10^{-8}$	$1{,}6 \cdot 10^{-8}$	$3{,}6 \cdot 10^{-5}$	$4{,}5 \cdot 10^{-36}$	0,009	**0,00964**	0,009
	2	1	-1	1	-1	0,00814	0,00809	0,00819	**0,00814**	$2{,}4 \cdot 10^{-8}$					**0,00836**	
	3	1	1	-1	-1	0,00981	0,00975	0,00986	**0,00981**	$9{,}1 \cdot 10^{-9}$					**0,00964**	
	4	1	1	1	1	0,00858	0,00853	0,00863	**0,00858**	$1{,}1 \cdot 10^{-8}$					**0,00836**	
	r_{xyi}	–	0,29	-0,957	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч} < G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,3813; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.						Условие адекватности $(0 \le \Delta_{аппр} < \cdot 10 \div 15)$			Условие качества $(80 \le R^2 \le 100)$	
	b_k	0,00900	0,00019	-0,00064	0,00019											
	$t_{табл}$=2,31 t_k расч	249,2	2,1	17,7	2,1	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	$\Delta_{аппр}$ (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Нз.	Зн.	Нз.	k_1;k_2	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель		$\hat{y} = 9 \cdot 10^{-3} - 6{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot x_2$			2;8	$2{,}9 \cdot 10^{-28}$	4,46	–	Адекватна	**0,75**	**2,18**			**91,6**	
	Натуральная мат. модель		$\hat{y} = 0{,}0158 - 1{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot x_2$			2;8	–	4,46	21,7	Адекватна						

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
120 000	1	1	-1	-1	1	0,00977	0,00972	0,00983	**0,00977**	$3 \cdot 10^{-9}$	$6{,}3 \cdot 10^{-9}$	$2{,}3 \cdot 10^{-5}$	$4{,}1 \cdot 10^{-35}$	0,00931	**0,00998**	0,00931
	2	1	-1	1	-1	0,00841	0,00837	0,00846	**0,00841**	$8{,}3 \cdot 10^{-9}$					**0,00864**	
	3	1	1	-1	-1	0,01019	0,01014	0,01025	**0,01019**	$2{,}3 \cdot 10^{-9}$					**0,00998**	
	4	1	1	1	1	0,00887	0,00882	0,00891	**0,00887**	$1{,}1 \cdot 10^{-8}$					**0,00864**	
	r_{xyi}	–	0,31	-0,950	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч} < G_{табл}$)						Условие адекватности			Условие качества	
	b_k	0,00931	0,00022	-0,00067	0,00022	$G_{расч}$ = 0,4561; $G_{табл}$ = 0,7679						$(0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15)$			$(80 \le R^2 \le 100)$	
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	407,8	2,2	29,4	2,2	Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.										
						Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Нз.	Зн.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод	(Зн. b_k)					
	Кодированная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{9{,}3 \cdot 10^{-3} - 6{,}7 \cdot 10^{-4} \cdot x_2}$			2;8	$6{,}5 \cdot 10^{-27}$	4,46	–	Адекватна	**0,76**	**2,38**			**90,3**	
	Натуральная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{0{,}0164 - 1{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot x_2}$			2;8	–	4,46	18,6	Адекватна						
135 000	1	1	-1	-1	1	0,01005	0,00999	0,01010	**0,01005**	$3{,}5 \cdot 10^{-8}$	$2{,}6 \cdot 10^{-8}$	$4{,}6 \cdot 10^{-5}$	$1{,}8 \cdot 10^{-35}$	0,00962	**0,01029**	0,00962
	2	1	-1	1	-1	0,00867	0,00863	0,00872	**0,00867**	$2{,}1 \cdot 10^{-9}$					**0,00894**	
	3	1	1	-1	-1	0,01054	0,01049	0,01060	**0,01054**	$2{,}1 \cdot 10^{-8}$					**0,01029**	
	4	1	1	1	1	0,00920	0,00916	0,00925	**0,00920**	$4{,}5 \cdot 10^{-8}$					**0,00894**	
	r_{xyi}	–	0,35	-0,935	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч} < G_{табл}$)						Условие адекватности			Условие качества	
	b_k	0,00962	0,00026	-0,00068	0,00026	$G_{расч}$ = 0,4367; $G_{табл}$ = 0,7679						$(0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15)$			$(80 \le R^2 \le 100)$	
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	207,2	2,2	14,6	2,2	Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.										
						Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Нз.	Зн.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод	(Зн. b_k)					
	Кодированная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{9{,}6 \cdot 10^{-3} - 6{,}8 \cdot 10^{-4} \cdot x_2}$			2;8	$7 \cdot 10^{-28}$	4,46	–	Адекватна	**0,74**	**2,69**			**87,5**	
	Натуральная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{0{,}0168 - 1{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot x_2}$			2;8	–	4,46	13,9	Адекватна						
150 000	1	1	-1	-1	1	0,01041	0,01036	0,01047	**0,01041**	$4{,}8 \cdot 10^{-8}$	$4{,}1 \cdot 10^{-8}$	$5{,}9 \cdot 10^{-5}$	0	0,00998	**0,01068**	0,00998
	2	1	-1	1	-1	0,00899	0,00894	0,00904	**0,00899**	$2{,}1 \cdot 10^{-9}$					**0,00928**	
	3	1	1	-1	-1	0,01095	0,01089	0,01100	**0,01095**	$3{,}9 \cdot 10^{-8}$					**0,01068**	
	4	1	1	1	1	0,00957	0,00952	0,00961	**0,00957**	$7{,}8 \cdot 10^{-8}$					**0,00928**	
	r_{xyi}	–	0,37	-0,929	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч} < G_{табл}$)						Условие адекватности			Условие качества	
	b_k	0,00998	0,00028	-0,00070	0,00028	$G_{расч}$ = 0,4719; $G_{табл}$ = 0,7679						$(0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15)$			$(80 \le R^2 \le 100)$	
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	170,3	2,1	11,9	2,1	Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.										
						Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Нз.	Зн.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод	(Зн. b_k)					
	Кодированная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{9{,}9 \cdot 10^{-3} - 7 \cdot 10^{-4} \cdot x_2}$			2;8	0	4,46	–	Адекватна	**0,74**	**2,80**			**86,4**	
	Натуральная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{0{,}0174 - 1{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot x_2}$			2;8	–	4,46	12,7	Адекватна						

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
165 000	1	1	-1	-1	1	0,01102	0,01096	0,01107	**0,01102**	$1{,}8\cdot10^{-8}$	$1{,}9\cdot10^{-8}$	$4{,}0\cdot10^{-5}$	$1{,}8\cdot10^{-35}$	0,01052	**0,01128**	0,01052
	2	1	-1	1	-1	0,00945	0,00940	0,00949	**0,00945**	$3{,}9\cdot10^{-8}$					**0,00976**	
	3	1	1	-1	-1	0,01153	0,01148	0,01159	**0,01153**	$3\cdot10^{-9}$					**0,01128**	
	4	1	1	1	1	0,01008	0,01004	0,01013	**0,01008**	$1{,}6\cdot10^{-8}$					**0,00976**	
	r_{xy_i}	–	0,36	-0,933	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,5137; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.						Условие адекватности ($0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	0,01052	0,00029	-0,00076	0,00029											
	$t_{табл}$=2,31 $t_{k\ расч}$	263,1	2,2	18,9	2,2	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Нз.	Зн.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{1{,}05\cdot10^{-2} - 7{,}6\cdot10^{-4}\cdot x_2}$				2;8	$9{,}4\cdot10^{-28}$	4,46	–	Адекватна	**0,76**	**2,78**			**87,2**	
	Натуральная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{0{,}0185 - 2\cdot10^{-6}\cdot x_2}$				2;8	–	4,46	13,6	Адекватна						
180 000	1	1	-1	-1	1	0,01140	0,01135	0,01146	**0,01140**	$1{,}8\cdot10^{-8}$	$2{,}6\cdot10^{-8}$	$4{,}6\cdot10^{-5}$	0	0,01096	**0,01174**	0,01096
	2	1	-1	1	-1	0,00976	0,00972	0,00981	**0,00976**	$3{,}9\cdot10^{-8}$					**0,01018**	
	3	1	1	-1	-1	0,01208	0,01203	0,01214	**0,01208**	$3{,}9\cdot10^{-8}$					**0,01174**	
	4	1	1	1	1	0,01060	0,01055	0,01065	**0,01060**	$5{,}2\cdot10^{-9}$					**0,01018**	
	r_{xy_i}	–	0,44	-0,899	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,3858; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.						Условие адекватности ($0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	0,01096	0,00038	-0,00078	0,00038											
	$t_{табл}$=2,31 $t_{k\ расч}$	237,5	2,2	16,9	2,2	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Нз.	Зн.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{1{,}1\cdot10^{-2} - 7{,}8\cdot10^{-4}\cdot x_2}$				2;8	0	4,46	–	Адекватна	**0,75**	**3,50**			**80,8**	
	Натуральная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{0{,}0192 - 2{,}1\cdot10^{-6}\cdot x_2}$				2;8	–	4,46	8,4	Адекватна						

ПРИЛОЖЕНИЕ Ц

Результаты регрессионного анализа изменения интенсивности изнашивания

Наработка, км	Номер опыта	Кодированное значение варьируемых- управляемых факторов				Выходной параметр эксперимента (k_T)			$\bar{\bar{\bar{y}}}_i'$	S^2	$S_в^2$	$S\{b_k\}$	$S_{ад}^2$	$\bar{\bar{\bar{y}}}'$	$\hat{y}_i$	$\bar{\hat{y}}_i$
		x_0	x_1	x_2	x_1x_2	$\bar{\bar{\bar{y}}}_{2300}$	$\bar{\bar{\bar{y}}}_{2301}$	$\bar{\bar{\bar{y}}}_{2401}$								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0	1	1	-1	-1	1	1,27	1,26	1,29	**1,27**	$1{,}75\cdot10^{-4}$	$2{,}4\cdot10^{-4}$	$4{,}4\cdot10^{-3}$	$7\cdot10^{-32}$	1,31	**1,28**	1,31
	2	1	-1	1	-1	1,29	1,28	1,31	**1,29**	$1{,}75\cdot10^{-4}$					**1,28**	
	3	1	1	-1	-1	1,32	1,31	1,34	**1,32**	$2{,}19\cdot10^{-4}$					**1,34**	
	4	1	1	1	1	1,35	1,34	1,37	**1,35**	$3{,}75\cdot10^{-4}$					**1,34**	
	r_{xyi}	–	0,90	0,42	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,3971; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.						Условие адекватности ($0 \le \Delta_{аппр} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	1,311	0,027	0,013	0,003											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	295,45	6,14	2,18	0,63	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	$\Delta_{аппр}$ (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Зн.	Нз.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{1{,}31 + 2{,}7\cdot10^{-2}\cdot x_1}$				2;8	$3{,}1\cdot10^{-28}$	4,46	–	Адекватна	**0,56**	**0,97**			**81,3**	
	Натуральная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{0{,}6 + 1{,}1\cdot10^{-3}\cdot x_1}$				2;8	–	4,46	97,2	Адекватна						
15 000	1	1	-1	-1	1	1,40	1,39	1,42	**1,40**	$1{,}53\cdot10^{-4}$	$1{,}7\cdot10^{-4}$	$3{,}8\cdot10^{-3}$	$7\cdot10^{-32}$	1,43	**1,41**	1,43
	2	1	-1	1	-1	1,42	1,41	1,43	**1,42**	$1{,}75\cdot10^{-4}$					**1,41**	
	3	1	1	-1	-1	1,43	1,42	1,45	**1,43**	$1{,}75\cdot10^{-4}$					**1,44**	
	4	1	1	1	1	1,45	1,43	1,46	**1,45**	$1{,}75\cdot10^{-4}$					**1,44**	
	r_{xyi}	–	0,89	0,46	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,2582; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.						Условие адекватности ($0 \le \Delta_{аппр} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	1,426	0,014	0,007	-0,001											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	379,52	3,70	1,92	0,15	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	$\Delta_{аппр}$ (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Зн.	Нз.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{1{,}43 + 1{,}4\cdot10^{-2}\cdot x_1}$				2;8	$4{,}4\cdot10^{-28}$	4,46	–	Адекватна	**0,26**	**0,51**			**78,6**	
	Натуральная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{1{,}1 + 5{,}6\cdot10^{-4}\cdot x_1}$				2;8	–	4,46	82,9	Адекватна						

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
30 000	1	1	-1	-1	1	1,50	1,49	1,51	**1,50**	$1{,}75\cdot10^{-4}$	$1{,}8\cdot10^{-4}$	$3{,}8\cdot10^{-3}$	0	1,52	**1,50**	1,52
	2	1	-1	1	-1	1,51	1,49	1,52	**1,51**	$1{,}75\cdot10^{-4}$					**1,50**	
	3	1	1	-1	-1	1,53	1,52	1,55	**1,53**	$1{,}75\cdot10^{-4}$					**1,54**	
	4	1	1	1	1	1,55	1,53	1,56	**1,55**	$1{,}75\cdot10^{-4}$					**1,54**	
	r_{xyi}	–	0,96	0,26	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,2500; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.					Условие адекватности ($0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	398,47	4,80	1,31	2,21											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	414,4	2	33	2	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Зн.	Нз.	Нз.	k_1;k_2	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{1{,}52} + \mathbf{1{,}8\cdot10^{-2}} \cdot x_1$			2;8	0	4,46	–	Адекватна	**0,33**	**0,33**			**78,6**	
	Натуральная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{1{,}03} + \mathbf{7{,}3\cdot10^{-4}} \cdot x_1$			2;8	–	4,46	82,9	Адекватна						
45 000	1	1	-1	-1	1	1,68	1,67	1,69	**1,68**	$1{,}19\cdot10^{-4}$	$1{,}6\cdot10^{-4}$	$3{,}6\cdot10^{-3}$	0	1,69	**1,68**	1,69
	2	1	-1	1	-1	1,69	1,67	1,70	**1,69**	$1{,}75\cdot10^{-4}$					**1,68**	
	3	1	1	-1	-1	1,70	1,68	1,71	**1,70**	$1{,}53\cdot10^{-4}$					**1,70**	
	4	1	1	1	1	1,71	1,69	1,72	**1,71**	$1{,}75\cdot10^{-4}$					**1,70**	
	r_{xyi}	–	0,88	0,47	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности: $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,2813; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.					Условие адекватности ($0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	1,692	0,009	0,005	0,009											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	469,85	2,62	1,39	2,12	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Зн.	Нз.	Нз.	k_1;k_2	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{1{,}69} + \mathbf{9{,}4\cdot10^{-3}} \cdot x_1$			2;8	0	4,46	–	Адекватна	**0,15**	**0,30**			**77,9**	
	Натуральная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{1{,}4} + \mathbf{3{,}8\cdot10^{-4}} \cdot x_1$			2;8	–	4,46	172,5	Адекватна						
60 000	1	1	-1	-1	1	1,78	1,77	1,79	**1,78**	$1{,}75\cdot10^{-4}$	$1{,}8\cdot10^{-4}$	$3{,}9\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-31}$	1,79	**1,78**	1,79
	2	1	-1	1	-1	1,79	1,78	1,80	**1,79**	$1{,}86\cdot10^{-4}$					**1,78**	
	3	1	1	-1	-1	1,80	1,79	1,81	**1,80**	$1{,}75\cdot10^{-4}$					**1,80**	
	4	1	1	1	1	1,81	1,79	1,82	**1,81**	$1{,}75\cdot10^{-4}$					**1,80**	
	r_{xyi}	–	0,92	0,38	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,2617; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.					Условие адекватности ($0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	1,794	0,009	0,004	0,009											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	466,07	2,45	1,01	2,15	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Зн.	Нз.	Нз.	k_1;k_2	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{1{,}79} + \mathbf{9{,}4\cdot10^{-3}} \cdot x_1$			2;8	$1{,}7\cdot10^{-27}$	4,46	–	Адекватна	**0,14**	**0,22**			**85,3**	
	Натуральная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{1{,}5} + \mathbf{3{,}8\cdot10^{-4}} \cdot x_1$			2;8	–	4,46	104,7	Адекватна						

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
75 000	1	1	-1	-1	1	1,91	1,89	1,92	**1,90**	$4{,}53\cdot10^{-4}$	$4{,}1\cdot10^{-4}$	$5{,}9\cdot10^{-3}$	$6{,}7\cdot10^{-31}$	1,92	**1,91**	1,92
	2	1	-1	1	-1	1,91	1,90	1,93	**1,91**	$4{,}86\cdot10^{-4}$					**1,91**	
	3	1	1	-1	-1	1,92	1,91	1,93	**1,92**	$3{,}19\cdot10^{-4}$					**1,93**	
	4	1	1	1	1	1,93	1,91	1,94	**1,93**	$3{,}86\cdot10^{-4}$					**1,93**	
	r_{xy_i}	–	0,94	0,35	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,2956; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.					Условие адекватности ($0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)		
	b_k	1,917	0,009	0,003	0,009											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	327,46	2,52	0,57	1,52	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Зн.	Нз.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{1{,}92 + 8{,}9\cdot10^{-3}\cdot x_1}$			2;8	$1{,}6\cdot10^{-27}$	4,46	–	Адекватна	**0,13**	**0,17**			**87,7**	
	Натуральная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{1{,}7 + 3{,}6\cdot10^{-4}\cdot x_1}$			2;8	–	4,46	69,9	Адекватна						
90 000	1	1	-1	-1	1	2,11	2,10	2,13	**2,12**	$3{,}53\cdot10^{-4}$	$2{,}6\cdot10^{-4}$	$4{,}7\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-31}$	2,13	**2,12**	2,13
	2	1	-1	1	-1	2,12	2,11	2,13	**2,12**	$3{,}19\cdot10^{-4}$					**2,12**	
	3	1	1	-1	-1	2,14	2,12	2,15	**2,14**	$2{,}19\cdot10^{-4}$					**2,14**	
	4	1	1	1	1	2,14	2,13	2,16	**2,14**	$1{,}53\cdot10^{-4}$					**2,14**	
	r_{xy_i}	–	0,96	0,29	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,3378; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.					Условие адекватности ($0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)		
	b_k	2,130	0,011	0,003	0,011											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	456,62	2,38	0,71	2,28	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Зн.	Нз.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{2{,}13 + 1{,}1\cdot10^{-2}\cdot x_1}$			2;8	$1{,}1\cdot10^{-27}$	4,46	–	Адекватна	**0,14**	**0,16**			**91,7**	
	Натуральная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{1{,}8 + 4{,}4\cdot10^{-4}\cdot x_1}$			2;8	–	4,46	26,1	Адекватна						
105 000	1	1	-1	-1	1	2,38	2,36	2,39	**2,37**	$8{,}75\cdot10^{-4}$	$8{,}4\cdot10^{-4}$	$8{,}4\cdot10^{-3}$	0	2,39	**2,38**	2,39
	2	1	-1	1	-1	2,38	2,37	2,40	**2,38**	$7{,}19\cdot10^{-4}$					**2,38**	
	3	1	1	-1	-1	2,40	2,38	2,41	**2,39**	$8{,}75\cdot10^{-4}$					**2,40**	
	4	1	1	1	1	2,40	2,39	2,42	**2,40**	$8{,}75\cdot10^{-4}$					**2,40**	
	r_{xy_i}	–	0,92	0,38	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,2616; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.					Условие адекватности ($0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)		
	b_k	2,387	0,009	0,004	0,009											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	285,99	2,33	0,47	1,13	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Зн.	Нз.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{2{,}39 + 9{,}4\cdot10^{-3}\cdot x_1}$			2;8	0	4,46	–	Адекватна	**0,11**	**0,16**			**85,3**	
	Натуральная мат. модель		$\hat{y} = \mathbf{2{,}1 + 3{,}8\cdot10^{-4}\cdot x_1}$			2;8	–	4,46	21,7	Адекватна						

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
120 000	1	1	-1	-1	1	2,65	2,63	2,66	**2,65**	$4{,}75\cdot10^{-4}$	$4{,}4\cdot10^{-4}$	$6{,}1\cdot10^{-3}$	0	2,66	**2,65**	2,66
	2	1	-1	1	-1	2,65	2,64	2,67	**2,65**	$4{,}75\cdot10^{-4}$					**2,65**	
	3	1	1	-1	-1	2,67	2,65	2,68	**2,66**	$4{,}53\cdot10^{-4}$					**2,67**	
	4	1	1	1	1	2,67	2,66	2,69	**2,68**	$3{,}53\cdot10^{-4}$					**2,67**	
	r_{xyi}	–	0,91	0,40	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,2706; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.						Условие адекватности ($0 \le \Delta_{аппр} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	2,660	0,010	0,004	0,010											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	439,84	2,65	0,73	1,65	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	$\Delta_{аппр}$ (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Зн.	Нз.	Нз.	k_1;k_2	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{2{,}66 + 1{,}0\cdot10^{-2}\cdot x_1}$				2;8	0	4,46	–	Адекватна	**0,10**	**0,17**			**82,7**	
	Натуральная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{2{,}4 + 4{,}0\cdot10^{-4}\cdot x_1}$				2;8	–	4,46	18,6	Адекватна						
135 000	1	1	-1	-1	1	3,34	3,33	3,35	**3,34**	$1{,}52\cdot10^{-3}$	$1{,}2\cdot10^{-3}$	$9{,}8\cdot10^{-3}$	0	3,36	**3,34**	3,36
	2	1	-1	1	-1	3,35	3,33	3,36	**3,34**	$1{,}55\cdot10^{-3}$					**3,34**	
	3	1	1	-1	-1	3,36	3,35	3,38	**3,36**	$9{,}53\cdot10^{-4}$					**3,37**	
	4	1	1	1	1	3,38	3,36	3,39	**3,38**	$5{,}75\cdot10^{-4}$					**3,37**	
	r_{xyi}	–	0,93	0,33	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,3376; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.						Условие адекватности ($0 \le \Delta_{аппр} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	3,357	0,016	0,006	0,016											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	342,89	2,59	0,57	1,59	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	$\Delta_{аппр}$ (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Зн.	Нз.	Нз.	k_1;k_2	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{3{,}36 + 1{,}6\cdot10^{-2}\cdot x_1}$				2;8	0	4,46	–	Адекватна	**0,13**	**0,17**			**87,1**	
	Натуральная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{2{,}9 + 6{,}2\cdot10^{-4}\cdot x_1}$				2;8	–	4,46	13,9	Адекватна						
150 000	1	1	-1	-1	1	3,70	3,69	3,72	**3,70**	$7{,}19\cdot10^{-4}$	$7{,}9\cdot10^{-4}$	$8{,}1\cdot10^{-3}$	0	3,72	**3,71**	3,72
	2	1	-1	1	-1	3,71	3,70	3,72	**3,71**	$6{,}86\cdot10^{-4}$					**3,71**	
	3	1	1	-1	-1	3,72	3,71	3,74	**3,72**	$8{,}75\cdot10^{-4}$					**3,73**	
	4	1	1	1	1	3,73	3,72	3,74	**3,73**	$8{,}86\cdot10^{-4}$					**3,73**	
	r_{xyi}	–	0,91	0,40	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,2798; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.						Условие адекватности ($0 \le \Delta_{аппр} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	3,716	0,010	0,004	0,010											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	457,45	2,43	0,55	1,23	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	$\Delta_{аппр}$ (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Зн.	Нз.	Нз.	k_1;k_2	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{3{,}72 + 1{,}0\cdot10^{-2}\cdot x_1}$				2;8	0	4,46	–	Адекватна	**0,07**	**0,12**			**82,7**	
	Натуральная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{3{,}4 + 4{,}0\cdot10^{-4}\cdot x_1}$				2;8	–	4,46	12,7	Адекватна						

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
165 000	1	1	-1	-1	1	4,48	4,47	4,49	**4,48**	$4{,}19\cdot10^{-4}$	$4{,}0\cdot10^{-4}$	$5{,}8\cdot10^{-3}$	$1{,}2\cdot10^{-30}$	4,50	**4,49**	4,50
	2	1	-1	1	-1	4,49	4,48	4,51	**4,49**	$3{,}86\cdot10^{-4}$					**4,49**	
	3	1	1	-1	-1	4,50	4,49	4,51	**4,50**	$4{,}19\cdot10^{-4}$					**4,51**	
	4	1	1	1	1	4,51	4,50	4,53	**4,51**	$3{,}75\cdot10^{-4}$					**4,51**	
	r_{xyi}	–	0,90	0,43	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,2622; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.					Условие адекватности ($0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	4,497	0,011	0,005	0,011											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	778,94	2,83	0,87	1,83	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Зн.	Нз.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{4{,}50 + 1{,}1\cdot10^{-2}\cdot x_1}$				2;8	$3{,}0\cdot10^{-27}$	4,46	–	Адекватна	**0,06**	**0,11**			**81,5**	
	Натуральная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{4{,}2 + 4{,}2\cdot10^{-4}\cdot x_1}$				2;8	–	4,46	13,6	Адекватна						
180 000	1	1	-1	-1	1	5,21	5,20	5,23	**5,22**	$4{,}53\cdot10^{-4}$	$3{,}0\cdot10^{-4}$	$5{,}0\cdot10^{-3}$	0	5,28	**5,24**	5,28
	2	1	-1	1	-1	5,26	5,25	5,28	**5,26**	$2{,}19\cdot10^{-4}$					**5,24**	
	3	1	1	-1	-1	5,30	5,29	5,31	**5,30**	$3{,}19\cdot10^{-4}$					**5,32**	
	4	1	1	1	1	5,34	5,33	5,36	**5,34**	$2{,}19\cdot10^{-4}$					**5,32**	
	r_{xyi}	–	0,87	0,49	0	Критерий Кохрена: f=2;k=4; α = 0,05; (условие однородности $G_{расч}<G_{табл}$) $G_{расч}$ = 0,3739; $G_{табл}$ = 0,7679 Вывод: гипотеза об однородности дисперсии выполняется.					Условие адекватности ($0 \le \Delta_{annp} < \cdot 10 \div 15$)			Условие качества ($80 \le R^2 \le 100$)	
	b_k	5,279	0,041	0,023	0,041											
	$t_{табл}$=2,31 | t_k расч	1051,03	8,07	2,23	2,07	Критерий Фишера: α = 0,05; (условие: $F_{расч} < F_{табл} < F_{факт}$)					ε (%) (Зн. b_k)	Δ_{annp} (%)			R^2 (%)	
	Значимость b_k	Зн.	Зн.	Нз.	Нз.	$k_1;k_2$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	$F_{факт}$	Вывод						
	Кодированная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{5{,}28 + 4{,}1\cdot10^{-2}\cdot x_1}$				2;8	0	4,46	–	Адекватна	**0,21**	**0,43**			**76,0**	
	Натуральная мат. модель	$\hat{y} = \mathbf{4{,}2 + 1{,}6\cdot10^{-3}\cdot x_1}$				2;8	–	4,46	8,4	Адекватна						

ПРИЛОЖЕНИЕ Ш

Программный кодовый модуль численного прогнозирования ресурса муфты сцепления

```
    # --- 1. ПАРАМЕТРЫ В МИКРОМЕТРАХ (мкм) ---
    H_max_mkm = 600      # 0.6 мм = 600 мкм

    # --- 2. НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ---
    H_sum_mkm = 0.0      # Накопленный износ в мкм
    L_auto = 0           # Общая наработка в км
    L_cycle = 0          # Пробег на текущем СМ в км
    step = 1             # Шаг 1 км

    # --- 3. ЦИКЛ РАСЧЕТА ---
    while H_sum_mkm < H_max_mkm:

        # Интенсивность (мкм износа на 1 км наработки)
        if L_cycle < 15000:   I_i = 0.00137
        elif L_cycle < 30000: I_i = 0.001475
        elif L_cycle < 45000: I_i = 0.001605
        elif L_cycle < 60000: I_i = 0.00174
        elif L_cycle < 75000: I_i = 0.001855
        elif L_cycle < 90000: I_i = 0.002025
        elif L_cycle < 105000: I_i = 0.00229
        elif L_cycle < 120000: I_i = 0.002595
        elif L_cycle < 135000: I_i = 0.00301
        elif L_cycle < 150000: I_i = 0.00351
        elif L_cycle < 165000: I_i = 0.0045
        else: I_i = 0.00528

        # Приращение износа за 1 км
        H_sum_mkm += I_i

        # Увеличение счетчиков
        L_auto += step
        L_cycle += step

        # Условие ТО (Сброс наработки СМ)
        if L_cycle >= L_to:
            L_cycle = 0

    return L_auto

# Проверка
print(f"Ресурс при ТО 90 000 км: {calculate_resource_final(90000)} км")
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Э

Численная модель прогнозирования ресурса ГМКП

Исходные данные		
Количество включений за 1 км, раз/км	$N_{вкл.}$	4
Время включения муфты, сек.	$t_{вкл.}$	0,1
Ср. скорость вращения при смыкании (ведомых и ведущих дисков) муфты, об/мин	$n_{об.}$	300
Ср. диаметр фрикционного диска, мм	$d_{ср.}$	180
Начальная толщина фрикционного слоя, мм	H_0	0,6

			Переодичность ТО ГМКП - 180 тыс.км (регламентируемое заводом изготовителем)										Переодичность ТО ГМКП - 90 тыс.км (рациональное предложение по разработанному методу)								
	Интервалы наработки ГМКП, тыс.км	Кол-во включений муфты, тыс.раз	Наработка СМ до ТО, тыс.км	Наработка муфты сцепления, (Lм), тыс.км	Время трения, сек	Путь трения, км	Наработка СМ	Ср. интенсив. изн. за период наработки СМ, мкм/км	Износ за 15 тыс км (периода наработки), мм	Износ нарастающим итогом, мм	Остаточная толщина фрикционного материала		Наработка СМ до ТО, тыс.км	Наработка муфты сцепления, (Lм), тыс.км	Время трения, сек	Путь трения, км	Ср. интенсив. изн. за период наработки СМ, мкм/км	Износ за 15 тыс км (периода наработки), мм	Износ нарастающим итогом, мм	Остаточная толщина фрикционного материала,мм	
	0	0	0	0	0	0	0	1,23	0	0	0,6		0	0	0	0	1,23	0	0	0,6	
	0–15	60	0–15	15	6000	17	0–15	1,37	0,0232	0,0232	0,5768		0–15	15	6000	17	1,37	0,0232	0,0232	0,5768	
	15–30	120	15–30	30	12000	34	15–30	1,48	0,0250	0,0482	0,5518		15–30	30	12000	34	1,48	0,0250	0,0482	0,5518	
	30–45	180	30–45	45	18000	51	30–45	1,61	0,0272	0,0754	0,5246		30–45	45	18000	51	1,61	0,0272	0,0754	0,5246	
	45–60	240	45–60	60	24000	68	45–60	1,74	0,0295	0,1049	0,4951		45–60	60	24000	68	1,74	0,0295	0,1049	0,4951	
	60–75	300	60–75	75	30000	85	60–75	1,86	0,0315	0,1364	0,4636		60–75	75	30000	85	1,86	0,0315	0,1364	0,4636	
	75–90	360	75–90	90	36000	102	75–90	2,03	0,0343	0,1707	0,4293		75–90	90	36000	102	2,03	0,0344	0,1707	0,4293	ТО
	90–105	420	90-105	105	42000	119	90–105	2,26	0,0383	0,2090	0,3910		0–15	105	42000	119	1,37	0,0232	0,1939	0,4061	
	105–120	480	105–120	120	48000	136	105–120	2,53	0,0428	0,2518	0,3482		15–30	120	48000	136	1,48	0,0250	0,2189	0,3811	
	120–135	540	120–135	135	54000	153	120–135	2,86	0,0485	0,3003	0,2997		30–45	135	54000	153	1,61	0,0272	0,2461	0,3539	
	135–150	600	135–150	150	60000	170	135–150	3,39	0,0575	0,3578	0,2422		45–60	150	60000	170	1,74	0,0295	0,2756	0,3244	
	150–165	660	150–165	165	66000	187	150–165	4,11	0,0697	0,4275	0,1725		60–75	165	66000	187	1,86	0,0315	0,3071	0,2929	
	165–180	720	165–180	180	72000	204	165–180	4,89	0,0829	0,5104	0,0896		75–90	180	72000	204	2,03	0,0343	0,3414	0,2586	ТО
	180–195	780	0–15	195	78000	221	0–15	1,37	0,0232	0,5336	0,0664		0–15	195	78000	221	1,37	0,0232	0,3646	0,2354	
	195–210	840	15–30	210	84000	238	15–30	1,48	0,0250	0,5586	0,0414		15–30	210	84000	238	1,48	0,0250	0,3896	0,2104	
	210–225	900	30–45	225	90000	254	30–45	1,61	0,0272	0,5858	0,0142		30–45	225	90000	254	1,61	0,0272	0,4168	0,1832	
237 800 км	225–240	960	45–57	237	94800	268	45–53	1,71	0,0142	0,6	0		45–60	240	96000	271	1,74	0,0295	0,4463	0,1537	
	240–255	1020											60–75	255	102000	288	1,86	0,0315	0,4778	0,1222	
	255–270	1080											75–90	270	108000	305	2,03	0,0343	0,5121	0,0879	ТО
	270–285	1140											0–15	285	114000	322	1,37	0,0232	0,5353	0,0647	
	285–300	1200											15–30	300	120000	339	1,48	0,0250	0,5603	0,0397	
	300–315	1260											30–45	315	126000	356	1,61	0,0272	0,5875	0,0125	
321 345 км	315–321	1285,2											45–51	321	128500	363	1,71	0,0125	0,6	0	