

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

На правах рукописи

Граевский Игорь Станиславович

**МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ДИЗЕЛЬНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

Специальность: 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Черняев Игорь Олегович

Санкт-Петербург – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АТС С ДИЗЕЛЬНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ.....	13
1.1 Анализ структуры парка автотранспортных средств в Российской Федерации и нормативно-технических документов, устанавливающих требования к отработавшим газам дизельных двигателей и методам их проверки.....	13
1.2 Анализ конструкций систем подачи топлива современных дизельных двигателей.....	25
1.3 Анализ неисправностей топливной аппаратуры и их влияния на работоспособность и экологические показатели дизельных двигателей....	36
1.4 Анализ возможностей бортовых и внешних инструментов диагностирования топливной аппаратуры Common Rail.....	43
Выводы первой главе.....	49
2. ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ДЫМНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ЭЛЕКТРОННЫМ БЛОКОМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ	51
2.1 Концепция метода повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями	51
2.2 Анализ моделей процесса образования частиц сажи в цилиндрах дизельного двигателя	67
2.3 Комплекс математических моделей в методе повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями, основанном на непрерывном контроле параметров, используемых электронным блоком управления....	74
2.3.1 Обоснование зависимости параметров подачи топлива от характеристик распылителя форсунки	74

2.3.2 Обоснование зависимости параметров, характеризующих качество распыления топлива, от характеристик распылителя форсунки.....	75
2.3.3 Обоснование введения диагностического параметра – длительности впрыска топлива – зависящего от износа сопловых отверстий топливной форсунки	78
2.3.4 Обоснование зависимости дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от длительности впрыска топлива	79
Выводы по второй главе.....	81
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО	
ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАВИСИМОСТИ ДЫМНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ	
ГАЗОВ ОТ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ БЛОКОМ	
УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	
	83
3.1 Программа, методы, цели и задачи проведения экспериментальных исследований	83
3.2 Численное моделирование процесса впрыска и распыливания дизельного топлива в цилиндр двигателя.....	86
3.3 Экспериментальное исследование зависимости дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от длительности впрыска	92
3.3.1 Описание приборов и оборудования, используемого в экспериментальном исследовании	92
3.3.2 Методика проведения микроскопии исследуемой выборки форсунок для определения состояния элементов.....	97
3.3.3 Методика проведения экспериментального исследования по уточнению эмпирических коэффициентов зависимости дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от длительности впрыска.....	99
Выводы по третьей главе.....	107

4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ДИЗЕЛЬНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ.....	109
4.1 Разработка программно-аппаратного комплекса для реализации метода повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями	109
4.2 Разработка алгоритма работы программного обеспечения для реализации метода повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями	113
4.3 Рекомендации по внедрению и оценка эффективности метода повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями	124
4.3.1 Метод повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями.....	124
4.3.2 Расчёт предотвращенного экологического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха.....	126
4.3.3 Экономическая оценка внедрения метода повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями	128
Выводы по четвёртой главе.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	135
ПРИЛОЖЕНИЯ	156
<i>Приложение А</i> Документы, подтверждающие практическую значимость исследования.....	157
<i>Приложение Б</i> Свидетельство о поверке средства измерений	162
<i>Приложение В</i> Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.....	163

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Обеспечение экологической безопасности в различных отраслях и снижение ущерба окружающей среде от деятельности человека является одной из главных мировых тенденций. Автомобильный транспорт (АТ) на сегодняшний день считается основным источником загрязнения атмосферного воздуха в крупных городах. Ежегодно общий объем выбросов вредных и загрязняющих веществ от эксплуатации АТ достигает 700 млн. т. [1, 4].

По результатам современных исследований мелкие твёрдые частицы являются главным фактором, снижающим экологическую безопасность автомобильного транспорта. Основными источниками таких частиц являются продукты износа шин, тормозных колодок, а также отработавшие газы (ОГ) двигателей, в особенности – использующих дизельное топливо.

Постоянный рост автомобильного парка усиливает указанные негативные эффекты, в некоторых ситуациях делая их критическими. В промышленных или крупных городах при неблагоприятных градостроительных, транспортных и метеорологических условиях известны случаи формирования экстремального загрязнения воздуха, которое может сохраняться долгое время [6, 185].

Для снижения указанных негативных эффектов на автомобильном транспорте разработаны и реализуются конструктивные и эксплуатационные мероприятия. Однако существующие бортовые системы самодиагностики допускают эксплуатацию с нарушением требований к дымности отработавших газов без появления сигнализации о неисправности, а установленная в нормативных документах периодичность проверок и несвоевременное устранение причин превышения нормативных значений дымности нередко приводят к продолжительной эксплуатации АТ с нарушением нормативных требований к дымности ОГ.

В условиях существования указанных недостатков мероприятий, обеспечивающих соответствие состава отработавших газов нормативным

требованиям, для достижения требуемого уровня экологической безопасности автотранспортных средств с дизельным двигателем актуальным является расширение функций системы бортовой самодиагностики для обеспечения информирования об изменении значений параметров работы топливной аппаратуры, которое соответствует ухудшению экологических показателей двигателя и приводит к превышению допустимых значений дымности отработавших газов.

Для этого необходимо обоснование соответствующего диагностического параметра и разработка использующего данный параметр метода, основанного на непрерывном контроле параметров, используемых электронным блоком управления и позволяющего предупреждать эксплуатацию транспортных средств с нарушением требований к дымности отработавших газов. Решению указанной научной задачи и посвящена данная работа.

Степень разработанности исследования. Совершенствованию топливной системы дизельных двигателей посвящены работы следующих ученых и исследователей: Анисимов К.Ю., Астахов И.В., Балакин В.А., Башта Т.М., Борычев С.Н., Бышов Н.В., Васильев Г.В., Воробьев С.А., Голубев И.Г., Григорьев В.А., Грехов Л.В., Данилов Ю.И., Жуковский Н.Е., Загородских Б.П., Зайцев А.В., Иванов В.Г., Козлов А.Н., Коновалов Д.Н., Корнилов В.Н., Кравченко А.М., Кривцов С.Н., Кудрявцев С.О., Кокорев Г.Д., Кузнецов Т.Ф., Ларионов А.П., Ложкин В.Н., Ложкина О.В., Марков В.А., Марусин А.В., Мирошниченко А.В., Неговора А.В., Никитин Д.П., Ольшевский С., Петров С.В., Пенкин А.Л., Романов А.А., Солнцев А.А., Смирнов А.Л., Тарасенко А.П., Трусов В.И., Тришкин И.Б., Успенский И.А., Файнлейб Б.Н., Федоров А.В., Хакимов Р.Т., Чернышев А.К., Шишков В.Ю., Яковлев М.В. и др.

Анализ методов диагностирования топливной аппаратуры (ТА) показал, что вопрос, связанный с контролем технического состояния и периодичностью диагностирования изучен не всецело. Существуют международные (Правила ООН, ТР ТС 018/2011) и национальные (ГОСТ 33997–2016, ПДД РФ, Постановление Правительства РФ от 15.09.20 № 1434) документы, в которых

регламентированы требования к выбросам загрязняющих веществ с отработавшими газами, а также методы и средства их проверки. Важно отметить, что несмотря на достаточное большое количество нормативных документов различного уровня, они предполагают периодический контроль параметров с достаточно большой (от месяца до года) периодичностью, что допускает продолжительную эксплуатацию транспортных средств (ТС) с нарушениями.

Анализ существующих принципов и научных подходов диагностирования топливной аппаратуры (ТА) дизельных двигателей, изложенных в работах Белова П.М., Брилинга Н.Р., Бурячко В.Р., Вырубова Д.Н., Голубкова Л.Н., Дьяченко Н.Х., Карунина А.Л., Костина А.К., Луканина В.Н., Мазинга Е.К., Орлина А.С., Платонова В.Ф., Русинова Р.В., Эфроса В.М. , а также зарубежных учёных, таких как Neuwold J.V. (США) , Reitz R.D. (США) , Payri F. (Испания) , Onorati A. (Италия) , Zhao H. (Великобритания) , Schwarz C. (Германия) , Klimont Z. (Австрия) , Lelieveld J. (Германия) , Faiz A. (США) , Harrison R.M. (Великобритания) и др., говорит о перспективности и возможности применения систем непрерывного контроля дымности основанных на непрерывном контроле параметров, используемых электронным блоком управления. Исходя из этого можно говорить о необходимости разработки методов контроля параметров экологичности в режиме онлайн для транспортных средств, находящихся в эксплуатации.

Целью диссертационного исследования является разработка метода повышения экологической безопасности, предупреждающего нарушение требований к дымности отработавших газов при эксплуатации автомобильного транспорта с дизельными двигателями, основанного на непрерывном контроле параметров, используемых электронным блоком управления двигателем.

Для достижения цели в диссертации поставлены **следующие задачи**:

1. На основе анализа возможности контроля дымности отработавших газов по параметрам, используемым электронным блоком управления, обосновать введение соответствующего диагностического параметра, зависящего от износа

сопловых отверстий распылителя форсунки и являющегося параметром рабочего процесса, используемым электронным блоком управления.

2. Установить зависимость дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от значений введенного диагностического параметра

3. Разработать метод повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельным двигателем на основе контроля значений введенного диагностического параметра.

4. Предложить решения по практическому использованию разработанного метода и оценить экономический эффект от его применения.

Объектом исследования являются методы снижения токсичности дизельного двигателя на основе непрерывного контроля параметров, используемых электронным блоком управления.

Предметом исследования являются алгоритмы оценки технического состояния топливной аппаратуры на основе параметров системы бортовой самодиагностики и модели работы электронного блока управления двигателем.

Рабочая гипотеза. Выявление нарушения требований к дымности отработавших газов непосредственно в процессе работы автомобильного дизельного двигателя возможно косвенным способом за счёт анализа параметров, используемых электронным блоком управления двигателем, а именно, путём анализа изменения длительности открытия форсунки (длительность впрыска, цикловая подача) как диагностического параметра, связанного с износом или коксованием сопловых отверстий форсунки, износом посадочного места и иглы.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Научно обосновано введение диагностического параметра – длительности впрыска топлива – зависящего от износа сопловых отверстий распылителя форсунки и позволяющего осуществлять контроль дымности отработавших газов;

2. Установлена зависимость дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от длительности впрыска топлива.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в совершенствовании моделей описания процессов распыления топлива в цилиндре дизельного двигателя и расчета дымности отработавших газов, а именно, в обосновании взаимосвязи параметров регулирования рабочего процесса дизельного двигателя, используемых блоком управления, с дымностью отработавших газов, что позволяет использовать полученные результаты для дальнейших исследований, направленных на обеспечение экологической безопасности современных автотранспортных средств, в которых рабочие процессы регулируются электронными системами управления.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в:

1) разработке программно-аппаратного комплекса контроля дымности отработавших газов по изменению длительности управляющих сигналов форсунки, обеспечивающего применение разработанного метода в процессе эксплуатации автотранспортных средств;

2) разработке рекомендаций по внедрению метода повышения экологической безопасности автотранспортных средств (АТС) с дизельными двигателями, основанного на непрерывном контроле дымности отработавших газов, в работу организаций, осуществляющих эксплуатацию транспортных средств.

Методология и метод исследования базируется на применении системного анализа, апробированных статистических методов, программного обеспечения для обработки экспериментальных данных, а также математического описания работы дизельного двигателя.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование введения диагностического параметра – длительности впрыска – зависящего от износа сопловых отверстий распылителя форсунки и позволяющего осуществлять контроль дымности отработавших газов;

2. Зависимость дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от длительности впрыска топлива;

3. Метод повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями на основе непрерывного контроля значений диагностического параметра – длительности впрыска – используемого электронным блоком управления двигателем.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта: п.6 «Обеспечение экологической и дорожной безопасности автотранспортного комплекса; совершенствование методов автодорожной и экологической экспертизы, методов экологического мониторинга автотранспортных потоков».

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

- основные идеи, положенные в основу метода повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями, на основе непрерывного контроля параметров, используемых электронным блоком управления двигателем, принадлежат автору;

- автором самостоятельно выполнены теоретические исследования, а также лично выполнены все эксперименты, их подтверждающие;

- программно-аппаратный комплекс, реализующий разработанные метод, также разработан автором самостоятельно.

Степень достоверности проведённых исследований обоснована использованием методов системного анализа, применением признанного математического аппарата, а, именно, методов математического описания рабочих процессов в дизельных двигателях, моделей определения основных конструктивных характеристик двигателей и топливной аппаратуры, а также их основных параметров: цикловая подача, характеристики подачи топлива, в т.ч. средний диаметр капель, скорость тепловыделения и др., апробированных в работах других авторов; подтверждена результатами экспериментальных исследований, которые определяют связь между дымностью отработавших газов и параметрами, используемыми блоком управления дизельного двигателя; обеспечена публикациями в рецензируемых изданиях ВАК РФ.

Реализация результатов исследования. Результаты исследований в практической области подтверждаются: актами о внедрении результатов работы в производственный процесс АО «Автопарк № 1 «Спецтранс», ООО «АГС». Также результаты исследования внедрены в учебный процесс кафедры технической эксплуатации транспортных средств ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» для подготовки обучающихся по направлениям 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» направленность «Автомобильный сервис», 23.03.01 «Технология транспортных процессов, по научной специальности 2.9.5. «Эксплуатация автомобильного транспорта», по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства» в рамках разработки методических изданий и при ведении занятий по дисциплинам: «Диагностика электронных систем автотранспортных средств», «Диагностика современных электронных систем управления автотранспортных средств и их компонентами», «Силовые агрегаты», «Основы работоспособности технических систем и диагностика», «Эксплуатация автомобильного транспорта», «Техническая эксплуатация транспортных средств».

Апробация результатов. Результаты исследования были изложены на международных конференциях: Международной научно-практической конференция «Транспорт России: проблемы и перспективы – 2018», Санкт-Петербург, 13-14.11.2018г.; 13-ой (27–29.09.2018г.), 14-ой (21–24.10.2020г.), 15-ой (26–29.10.2022 г.), 16-ой (25-28.09.2024г.) Международных конференциях «Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах», Санкт-Петербург; 83-ей международной научно-методической и научно-исследовательской конференция МАДИ, Москва, 27–31.01.2025 г.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 10 научных работах, в том числе 5 – в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК, 2 статьи в изданиях, индексируемых Scopus, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы изложен на 163 страницах машинописного текста, включая 15 таблиц и 34 рисунка. Библиографический список содержит 191 наименование.

1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АТС С ДИЗЕЛЬНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

1.1 Анализ структуры парка автотранспортных средств в Российской Федерации и нормативно-технических документов, устанавливающих требования к отработавшим газам дизельных двигателей и методам их проверки

Количество и химический состав выбросов отработавших газов (ОГ) автомобильного двигателя зависит от множества факторов: техническое состояние, экологический класс, вид и качество топлива, условия эксплуатации и др. В таблицах 1.1 и 1.2 приведены некоторые данные по составу и количеству выбросов ОГ в зависимости от вида топлива и объёма двигателя [8].

Таблица 1.1 - Сравнение составов отработавших газов бензинового и дизельного двигателей. Источник: [8]

Формула компонента	Объёмная доля		Токсичность
	ОГ бензинового ДВС	ОГ дизельного ДВС	
N ₂	75	76	+
C ₂₀ H ₁₂	25	10	+
H ₂ O	3-13	0,5-10	-
CO ₂	5-12,5	1-12	-
CO	0,1-10	0,01-0,5	+
NO _x	0,05-0,5	0,1-10	+
C _x H _y	0,2-20	0,01-0,5	+
O ₂	0,05-8	2-18	+
C _n H _{2n} O	0-0,2	0-0,009	+
C	0-100мг/м ³	0-20г/м ³	+
SO _x	0,002	0,03	+
C ₈ H ₂₀ Pb	0,003	-	+

Пробеговые и удельный выбросы загрязняющих веществ в ОГ грузовыми автомобилями представлены в таблице 1.2

Таблица 1.2 - Пробеговые и удельный выбросы загрязняющих веществ грузовыми автомобилями. Источник: [8]

Объём ДВС, л	Тип ДВС	Пробеговые выбросы, г/км				Удельные выбросы, г/мин			
>2,0	Бенз.	22,7	2,8	0,6	0,9	4,5	0,4	0,05	0,012
	Диз.	2,3	0,6	2,2	0,33	0,8	0,2	0,16	0,054
2...5	Бенз.	29,7	5,5	0,8	0,15	10,2	1,7	0,2	0,02
	Диз.	3,5	0,7	2,6	0,39	1,5	0,25	0,5	0,072
	Газ	15,2	3,3	0,8	0,14	5,2	1	0,2	0,018
5...8	Бенз.	47,4	8,7	1,0	0,18	13,5	2,2	0,2	0,026
	Диз.	5,1	0,9	3,5	0,45	2,8	0,35	0,6	0,09
	Газ	24,2	5,1	1,0	0,16	6,9	1,3	0,2	0,026
8...16	Бенз.	79,0	10,2	1,8	0,24	13,5	2,9	0,2	0,029
	Диз.	6,1	1,0	4,0	0,54	2,9	0,45	1	0,1
>16	Диз	7,5	1,1	4,5	0,78	2,9	0,45	1	0,1

Для здоровья человека и других живых организмов наибольшую угрозу представляют канцерогенные вещества, содержащиеся в отработавших газах, среди которых особое внимание следует уделить полициклическим ароматическим углеводородам (C_xH_y). Наиболее активным канцерогенным веществом считается 3,4 бенз(а)пирен ($C_{20}H_{12}$), который образуется при неверной организации горения. Максимальное образование канцерогенных веществ, включая 3,4 бенз(а)пирен, наблюдается в условиях неустойчивых и переходных режимов.

Для Российской Федерации на ухудшение экологической ситуации существенно влияют следующие факторы:

1) Рост автопарка в России приводит к серьёзным экологическим последствиям — на 144,5 миллиона человек приходится 67 миллионов зарегистрированных транспортных средств. Этот факт особенно критичен для городов с высокой плотностью населения и, соответственно, высокими показателями автомобилизации, где выбросы оказывают наиболее заметное влияние на качество воздуха и здоровье людей. Динамика числа зарегистрированных автомобилей в России и прогноз их роста представлены на рисунке 1.1.

2) Несоответствие между темпами строительства дорог и быстрым ростом количества автомобилей создаёт значительную нагрузку на дорожную инфраструктуру. При фактической плотности свыше 300 автомобилей на 1 тыс. человек, дороги не справляются с потоком транспорта, что ведёт к ухудшению дорожной обстановки, износу дорожного покрытия и, как следствие, повышенным выбросам от простаивающих в заторах автомобилей.

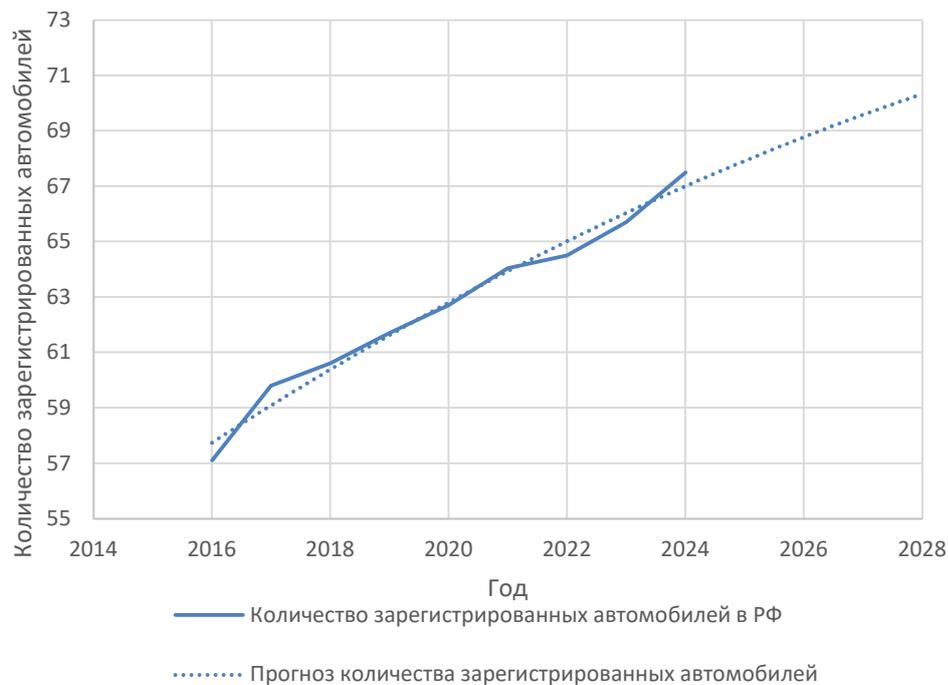


Рисунок 1.1. – Количество зарегистрированных в РФ автомобилей.

3) Состояние дорожной инфраструктуры в России оказывает значительное влияние на экономику и повседневную жизнь миллионов людей. Отсутствие дорог с твёрдым покрытием и круглогодичной доступности в 29 тыс. населённых пунктов усложняет логистику и ведёт к увеличению затрат на перевозку товаров и пассажиров.

4) Состояние автопарка в России вызывает серьёзные экологические и эксплуатационные проблемы. Устаревшие автомобили, возраст которых превышает 10 лет, имеют низкую полноту сгорания топлива и высокие выбросы токсичных веществ. Это связано с тем, что более 40% парка составляют машины с устаревшими двигателями и низким экологическим классом, соответствие которых современным экологическим нормам невозможно. В результате загрязнение воздуха в крупных городах и транспортных узлах становится одной из острых экологических проблем [7]. Информация о возрасте автомобильного парка представлена на рисунках 4 и 5 [22].



Рисунок 1.2 – Распределение по возрасту для коммерческого транспорта РФ.

Источник [22]

В соответствии с Техническим регламентом Таможенного союза «О безопасности колёсных транспортных средств» ТР ТС 018/2011, экологический класс представляет собой классификационный код, который определяет конструкцию транспортного средства или двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в зависимости от уровня выбросов вредных веществ. Он учитывает не только уровень выбросов, но и требования к системам бортовой самодиагностики (OBD) и механизмам, которые направлены на снижение выбросов в процессе эксплуатации. Экологический класс Евро-5 введён в действие в Российской Федерации с 1 января 2016 г. С этого момента все автомобили, производимые и импортируемые на территорию России, должны соответствовать требованиям данного стандарта, однако эти требования не распространяются на автомобили, находящиеся в эксплуатации. В то же время, согласно данным из рисунков 1.2 и 1.3 доля автомобилей коммерческого транспорта с дизельными двигателями классов Евро 5 и выше составляет всего около 20 % (рисунок 1.3).

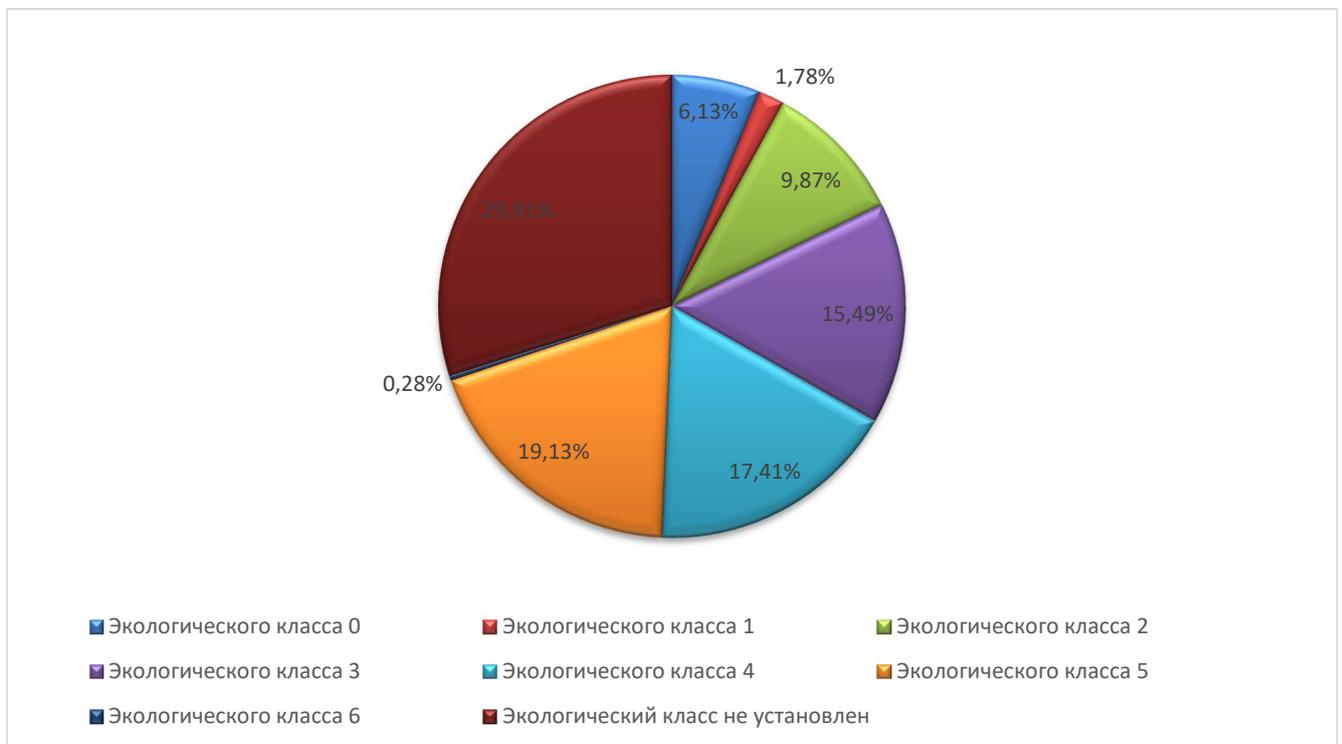


Рисунок 1.3 – Распределение по экологическим классам для коммерческого транспорта РФ. Источник [22]

Способы улучшения экологических показателей автомобильного транспорта (АТ) в основном связаны с совершенствованием конструкции транспортных средств. Они включают модернизацию систем управления силовыми агрегатами, внедрение технологий нейтрализации для снижения уровня загрязняющих веществ в выхлопных газах, а также переход на использование альтернативных источников энергии, таких как электричество или биотопливо.

Существующие методы контроля технического состояния транспортных средств в эксплуатации, направленные на обеспечение экологичности автомобилей, предусматривают регулярный контроль состава отработавших газов и своевременное техническое обслуживание транспортных средств для поддержания их соответствия экологическим стандартам. Проверки проводятся в соответствии с Техническим регламентом Таможенного Союза ТР ТС 018/2011, а также с учётом ГОСТ 33997–2016 «Колёсные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации».

Все документы в области требований, предъявляемых к транспортным средствам, находящимся в эксплуатации, можно условно разделить на 2 группы – это международные нормативные акты и национальные нормативные акты. Международные акты можно условно разделить на «Европейские» – правила, принятые ЕЭК ООН, и документы Евразийского экономического союза, в частности, Технический регламент Таможенного Союза «О безопасности колесных транспортных средств» ТР ТС 018/2011.

Начало формирования международных документов в сфере требований к техническому состоянию транспортных средств было положено в 1956 году, когда был подписан Римский договор, создавший Европейскую экономическую комиссию ООН (ЕЭК ООН) и заложивший основу для разработки единых стандартов. Уже в 1958 году был принят следующий важный документ — Женевское соглашение, направленное на упрощение процессов сертификации и повышение безопасности транспортных средств; СССР присоединился к обоим документам, что позволило ему участвовать в разработке международных

стандартов, хотя их внедрение ограничивалось особенностями плановой экономики и технической базы того времени.

Ранее согласованные в рамках этих документов предписания легли в основу системы правил ЕЭК ООН, которых на данный момент насчитывается около 157. Советский Союз активно участвовал в рабочих группах ЕЭК ООН, предлагая свои технические решения, однако многие международные стандарты были адаптированы в СССР через систему ГОСТов, а полная гармонизация стала возможной только после распада СССР. Процесс гармонизации отечественных нормативных документов с международными требованиями продолжается и сейчас, что отражено в таких документах, как ТР ТС 018/2011 и современных ГОСТах.

Ниже приведены наиболее существенные положения для целей исследования из ТР ТС:

Данный технический регламент устанавливает обязательные стандарты для колёсных транспортных средств, которые должны соблюдаться при продаже и эксплуатации в странах Единого экономического пространства (ЕЭП), независимо от того, где они были произведены.

Целью данных требований является:

- защита здоровья и безопасности людей;
- охрана окружающей среды;
- предотвращение вводящих в заблуждение действий по отношению к потребителям.

ТР регулирует следующие объекты:

- колёсные транспортные средства категорий L, M, N и O, предназначенные для передвижения по автомобильным дорогам общего пользования (далее - транспортные средства), а также их шасси;
- элементы транспортных средств, которые влияют на безопасность [9].

Раздел 9.1 Приложения № 8 к техническому регламенту определяет требования к экологическим характеристикам транспортных средств. Для газовых

и бензиновых двигателей требования представляют собой ограничения по содержанию количества СО в отработавших газах, представленные в таблице 1.

Таблица 1.3 – Нормативы содержания СО

Категория и комплектация ТС	Частота вращения коленчатого вала	СО, объёмная доля процентов
М и N без систем нейтрализации ОГ	min	3,5
	max	2
М и N Евро 2 и ниже, с системой нейтрализации ОГ	min	0,5
	max	0,3
М и N Евро 3 и выше, с системой нейтрализации ОГ	min	0,3
	max	0,2
L без систем нейтрализации ОГ	min	4,5

Для дизельных двигателей предельно допустимый уровень дымности отработанных газов в режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя не должен превышать величин, указанных в документах, подтверждающих соответствие транспортного средства требованиям Правил ЕЭК ООН № 24–03. Допустимые значения дымности отработанных газов для дизельных двигателей, если они не указаны в официальном утверждении или документации производителя, устанавливаются в соответствии с экологическим классом двигателя:

1. Для двигателей экологического класса 3 и ниже:

- 2,5 м⁻¹ для двигателей без наддува;
- 3,0 м⁻¹ для наддувных двигателей.

2. Для двигателей экологического класса 4 и выше:

- 1,5 м⁻¹ для всех типов двигателей.

К национальным документам можно отнести Правила дорожного движения (Постановление Правительства РФ № 1090), Постановление Правительства РФ от 15.09.20 № 1434("Об утверждении Правил проведения технического осмотра

транспортных средств, а также о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации"), а также ГОСТ 33997–2016, который устанавливает требования к безопасности эксплуатации колёсных транспортных средств. Требования в этих документах гармонизированы с международными соглашениями, подписанными РФ. ГОСТ 33997–2016 «Колёсные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации» представляет собой важный национальный стандарт, который направлен на установление единых требований безопасности для транспортных средств в процессе их эксплуатации в России. В разделе 5 стандарта содержатся методы проверки безопасности автомобилей, которые помогают обеспечить соответствие транспортных средств установленным нормам и стандартам. Стандарт принят взамен ряда предыдущих нормативов, таких как ГОСТ Р 51709–2001, ГОСТ Р 52231–2004, ГОСТ Р 52033–2003, ГОСТ Р 52160–2003, ГОСТ Р 54942–2012, которые действовали до 2018 года и использовались для соблюдения требований Технического регламента Таможенного Союза 018/2011.

Ниже приведены выдержки из раздела 5.9, посвящённого методам проверки дизельных двигателей:

«Дымность отработавших газов дизеля КТС допускается проверять при температуре окружающего воздуха от 0 °С до 35 °С и атмосферном давлении от 92 до 105 кПа». [Источник ГОСТ 33997-2016]

«Перед измерениями дымности проверяют комплектность и сохранность системы выпуска, ... При выявлении повреждений или некомплектности ... КТС признают несоответствующим установленным требованиям к дизелю». [Источник ГОСТ 33997-2016]

«Перед измерениями двигатель КТС прогревают ... до температуры не ниже 60 °С Для доставки отработавших газов от выпускной трубы КТС к измерительной камере дымомера используется пробоотборный зонд, который должен быть герметичен, чтобы избежать утечек и попадания воздуха». [Источник ГОСТ 33997-2016]

«Для подвода отработавших газов от выпускной трубы КТС к измерительной камере дымомера используют пробоотборный зонд, предотвращающий утечки и подсос воздуха.»

«Дымность измеряют в шести последовательных циклах свободного ускорения коленчатого вала двигателя.

- при работе двигателя в режиме холостого хода на n_{\min} равномерно перемещают педаль подачи топлива за 0.5...1.0 с до упора. Держат педаль в этом положении 2...3 с. Отпускают педаль и через 8 . . . 10 с приступают к выполнению следующего цикла;

- циклы свободного ускорения повторяют не менее шести раз;

- фиксируют максимальные показания дымомера X_{M_i} в каждом из последних четырех i -х циклов свободного ускорения;

- измеренные значения дымности X_{M_j} считают достоверными, если четыре последовательных значения не образуют убывающей зависимости и располагаются в зоне шириной 0,25 м¹;

По четырём последним измерениям дымности X_{M_i} рассчитывают среднеарифметическое значение дымности X_m , которое принимают за результат измерений и сравнивают полученное значение с нормативным. Схематический вид графиков изменения частоты вращения (n) и дымности (k) в процессе одного цикла свободного ускорения приведён на рисунке 1.4.» [Источник ГОСТ 33997-2016].

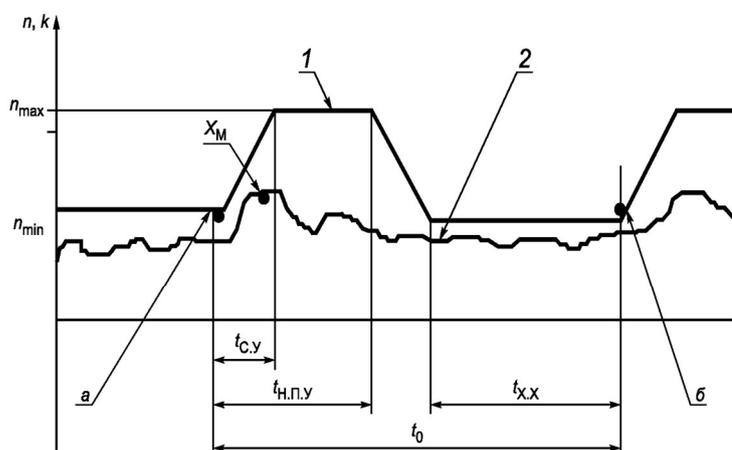
Правила дорожного движения (ПДД) РФ —нормативный акт, регулирующий порядок движения транспортных средств, а также требования к эксплуатации с целью обеспечения безопасности на дорогах.

В приложении к Основным положениям по допуску транспортных средств к эксплуатации и обязанностям должностных лиц по обеспечению безопасности дорожного движения» перечислены требования к двигателям и их системам:

8.1. Содержание вредных веществ в отработавших газах и их дымность превышают величины, установленные в таблице 9.1 и пункте 9.2 приложения N 8

к техническому регламенту. Указанная неисправность выявляется с использованием средств технического диагностирования.

Характерные формы графиков зависимости частоты вращения (n) и дымности (k) от времени (t) за единичный цикл свободного ускорения



а — начало 1-го цикла свободного ускорения; б — окончание 1-го и начало 2-го цикла свободного ускорения; 1 — частота вращения коленчатого вала двигателя (n); 2 — дымность отработавших газов двигателя (k); n_{\min} — минимальная частота вращения; n_{\max} — наибольшая частота вращения, достигаемая при свободном ускорении; t_0 — продолжительность цикла свободного ускорения (12...15 с); $t_{c,y}$ — время свободного ускорения от n_{\min} до n_{\max} (1...2 с); $t_{н.п.у}$ — время, в течение которого педаль остается нажатой до упора с момента начала цикла свободного ускорения (2...3 с); $t_{х.х}$ — время работы на n_{\min} (8...10 с) холостого хода двигателя; X_M — максимальное значение дымности в режиме свободного ускорения

Рисунок 1.4 – Характерные формы графиков зависимости частоты вращения и дымности в процессе 1 цикла [Источник ГОСТ 33997-2016].

8.2. «Системы питания и выпуска отработавших газов транспортного средства некомплектны и негерметичны...»

8.3. «Запорные устройства топливных баков и устройства перекрытия подачи топлива неисправны»

8.4. «Система питания газобаллонных транспортных средств, её размещение и установка не соответствуют требованиям, предусмотренным пунктом 9.8 приложения N 8 к техническому регламенту»

8.5. «Уровень шума выпуска отработавших газов транспортного средства превышает величины, установленные в таблице 9.2 приложения N 8 к техническому регламенту. Указанная неисправность выявляется с использованием средств технического диагностирования» [17].

Требования к содержанию загрязняющих веществ в отработавших газах также предъявлены в Приложении 1 к Постановлению Правительства РФ от 15.09.20 № 1434 "Об утверждении Правил проведения технического осмотра транспортных средств, а также о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями). Этот документ полностью гармонизирован с ТР ТС 018/2011 и ссылается на него тексте раздела «VI Двигатель и его системы»:

33. Содержание загрязняющих веществ в отработавших газах транспортных средств должно соответствовать требованиям, установленным пунктами 9.1 и 9.2 Приложения № 8 к ТР ТС 018/2011.

Со стороны надзорных органов также осуществляются периодические проверки технического состояния транспортных средств, особенно для транспортных средств, занимающихся перевозками пассажиров.

В рамках этих проверок осуществляется также и контроль соблюдения нормативов экологичности отработавших газов, в соответствии с требованиями ТР ТС 018/2011. Ответственность, предусмотренная за нарушение этих требований прописана в статьях 8.23, 12.1 и 12.5 КоАП РФ.

Статья 8.23 КоАП РФ регулирует ответственность за эксплуатацию транспортных средств, если их выбросы вредных веществ или уровень шума превышают установленные нормы.

Статья 12.1 КоАП РФ устанавливает ответственность за управление транспортным средством, которое не прошло обязательный технический осмотр или не зарегистрировано в установленном порядке.

Статья 12.5 КоАП РФ устанавливает ответственность за управление транспортным средством с неисправностями, которые делают эксплуатацию запрещённой, а также за использование транспортного средства с незаконно установленным знаком «Инвалид».

1. Управление транспортным средством с неисправностями, которые делают эксплуатацию запрещённой, наказывается предупреждением или штрафом в размере 500 рублей [18].

1.2 Анализ конструкций систем подачи топлива современных дизельных двигателей

Традиционной системой подачи топлива для дизельных двигателей является система отдельного впрыска. В таких системах практически (или полностью) отсутствуют электронные компоненты. Управляющее воздействие для открытия форсунок осуществляется механическим способом - увеличением давления в магистралях подачи топлива к форсункам. Такие системы имеют сравнительно невысокое давление впрыска, что определяет и качество распыливания топлива [29, 30, 186]. Кроме того, в процессе подачи топлива в магистралях возникают пульсации давления, что вызывает преждевременные отказы.

Частой причиной снижения эффективности работы двигателей с таким типом ТА является снижение максимального давления и уменьшение цикловой подачи топлива [31,32,33,186].

Также традиционные системы подачи топлива для дизелей с механическим регулированием отличаются высоким уровнем выбросов вредных веществ в выхлопных газах и увеличенным расходом топлива [30]. В настоящее время такую систему питания устанавливают на существенную часть автотракторных ТС большой грузоподъёмности [125, 126, 127, 128, 129, 130, 131 и др.]. Основы конструкции такой системы можно рассмотреть на примере распространённой в России системы с разделённым впрыском в двигателях КАМАЗ (изображена на рисунке 1.5) [28].

Увеличение давления впрыска топлива способствует повышению скорости истечения топлива из форсунки и уменьшению диаметра капель, что улучшает распыление и, соответственно, повышает эффективность сгорания топливовоздушной смеси в цилиндре двигателя, что ведёт к увеличению мощности дизеля и снижению расхода топлива.

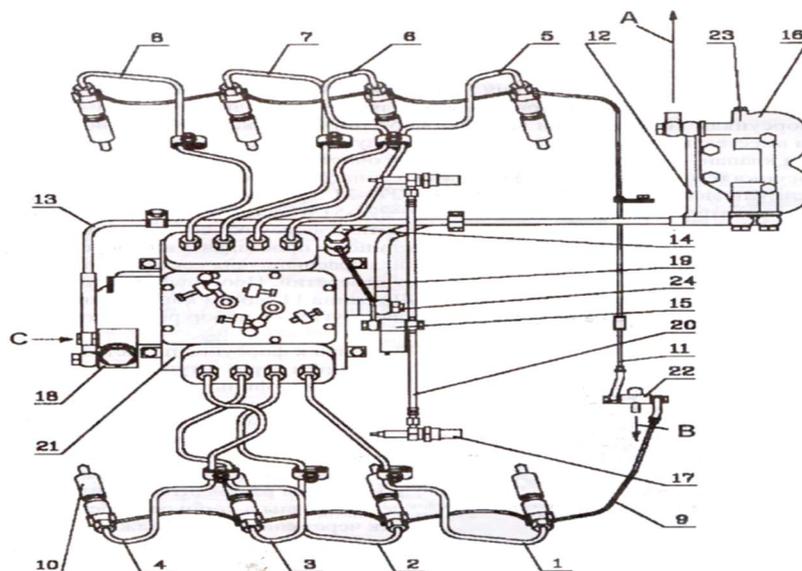
Однако, с увеличением давления впрыска возникает необходимость в более точном изготовлении прецизионных компонентов [33].

Традиционные топливные системы не могут полностью удовлетворить

современным требованиям по топливной экономичности, снижению выбросов токсичных веществ и уменьшению уровня шума.

Причины следующие:

- низкое давление впрыска;
- недостаточная точность дозирования топлива.



1-8 – трубки топливные высокого давления; 9 – трубка топливная дренажная форсунок левых головок; 10 – форсунка; 11 – трубка топливная дренажная форсунок правых головок; 12 – трубка топливная отводящая ТНВД; 13 – трубка отводящая топливного насоса; 14 – трубка топливная подводящая ТНВД; 15 – клапан ЭФУ; 16 – фильтр тонкой очистки топлива; 17 – свеча факельная; 18 – топливоподкачивающий насос; 19 – трубка подвода топлива к клапану ЭФУ; 20 – трубка топливная от магнитного клапана к штифтовым свечам; 21 – ТНВД; 22 – тройник; 23 – клапан-жиклер; 24 – перепускной клапан ТНВД; А, В – слив топлива в бак; С – подвод топлива от фильтра грубой очистки топлива.

Рисунок 1.5 – Топливная аппаратура КАМАЗ с разделённым впрыском.

С целью уменьшения загрязнения окружающей среды в последние годы проводится политика ужесточения требований к составу ОГ. Для достижения высоких экологических и экономических показателей дизельных двигателей необходимо комплексное применение современных конструктивных и технологических решений [34-37]. Технические улучшения в системе подачи топлива и системе управления рабочими процессами двигателей стали основой для разработки более эффективных и экологически чистых дизельных силовых установок.

Для достижения высокой эффективности работы дизельного двигателя и улучшения экологических и экономических характеристик необходимо обеспечить качественное смесеобразование и равномерную подачу топлива. Современные системы впрыска топлива должны быть способны адаптироваться под различные рабочие режимы двигателя, учитывая большое количество факторов, влияющих на процесс сгорания, таких как: цикловая подача топлива; угол опережения впрыска; давление впрыска; температура топлива и охлаждающей жидкости; параметры воздушного тракта.

Системы с электронным управлением впрыском топлива предоставляют гораздо больше возможностей для оптимизации процесса впрыска, что значительно улучшает характеристики работы дизельных двигателей. С помощью электроники легко контролируется большинство параметров топливной аппаратуры дизельного двигателя с помощью датчиков. Электронный блок управления анализирует их показания с помощью программного обеспечения, и затем отправляет управляющие сигналы на исполнительные механизмы, которые регулируют такие параметры рабочего процесса как цикловая подача, угол опережения, давление впрыска и др. Электроника также позволяет внедрять адаптивные системы управления впрыском по нескольким параметрам одновременно [38]. Это реализовано в системах с насос-форсунками (НФ) [20, 133, 184] (рисунок 1.6) и аккумуляторных системах (Common rail, CR) [107, 134, 135, 136, 137, 184].

В топливоподающей системе (ТПС) с насос-форсунками (UI – Unit Injector, НФ) насос и форсунка размещены в одном корпусе, что делает систему чрезвычайно компактной. Из-за малого расстояния между насосом и распылителем (около 30 мм [39]) потери давления минимальны. Топливо под высоким давлением присутствует в распылителе только во время впрыска, что уменьшает утечки через уплотнения.

В системе с насос-форсунками каждый цилиндр оснащён отдельной насос-форсункой, что устраняет необходимость в длинных соединительных трубопроводах, в которых могут возникать волновые явления. Такая система

значительно повышает точность дозировки топлива и исключает проблемы, связанные с изменением давления в системе, что возникает из-за пульсаций или волновых эффектов в трубопроводах.

Цикл впрыска топлива в рассматриваемых системах состоит из трех последовательных этапов, каждый из которых имеет свою функциональную значимость для оптимизации процесса сгорания и снижения вредных выбросов: пилотный (пред-) впрыск; основной (массовый) впрыск; последующий (пост-) впрыск.



Рисунок 1.6 – Устройство насос-форсунки.

Предвпрыск обеспечивает плавное воспламенение топливно-воздушной смеси и стабильность распространения фронта пламени. Основной впрыск обеспечивает формирование оптимальной топливно-воздушной смеси и ее эффективное сгорание при всех режимах функционирования двигателя внутреннего сгорания, что критически важно для достижения высоких показателей энергоэффективности. Пост-впрыск выполняет экологические

функции, включая регенерацию сажевого фильтра, что является ключевым фактором соответствия современным экологическим стандартам.

Преимущества: снижены колебания давления, высокое давление впрыска.

Недостатки: трудоёмкость монтажа; неравномерность подачи топлива при высоких оборотах двигателя; количество поствпрысков ограничено особенностями конструкции.

Неравномерность и нестабильность подачи топлива связаны с тем, что на высоких оборотах возникают крутильные колебания кулачкового вала [138,184].

Одним из существенных эксплуатационных недостатков системы НФ является высокая требовательность к качеству топлива. Это связано с особенностями конструкции НФ.

Система НФ обладает значительным недостатком в виде высокой стоимости из-за использования высокоточных компонентов и сложной технологией производства. Ремонт таких систем требует специализированного оборудования и высококвалифицированных специалистов, что делает его трудоёмким и дорогим. Существенным недостатком системы является привязка качества распыла к частоте вращения вала - на низких оборотах, когда давление впрыска падает, качество распыла топлива ухудшается, что приводит к недостаточному смешиванию топлива с воздухом.

К числу недостатков ТПС с НФ относится отсутствие возможности регулировать давление для каждого отдельного впрыскивания при постоянном ускорении плунжера [27, 40, 41, 42, 43, 44].

Решение о соответствии транспортного средства экологическому стандарту принимается после прохождения ездового цикла, который длится около 30 минут, в течение которых скорость и нагрузка на двигатель несколько раз изменяются от нуля до максимума [40]. Поэтому системы типа НФ, в которых качество распыла топлива ухудшается при снижении частоты вращения коленчатого вала, не могут конкурировать с системами CR по уровню выбросов вредных веществ в выхлопных газах [44].

Топливная система Common Rail состоит из двух контуров подачи топлива,

управляемых электронным блоком управления. Сначала под низким давлением, а затем под высоким. На рисунке 1.7 представлено устройство топливной системы Common Rail.

Для транспортировки топлива из резервуара (fuel tank) используется насос низкого давления, обеспечивающий предварительную фильтрацию (fuel filter) и деэмульсацию жидкости. Далее подготовленное топливо направляется в топливный насос высокого давления (ТНВД, fuel pump). Привод плунжеров осуществляется через кулачковый вал с оптимизированным профилем, взаимодействующий с толкателем. Конфигурация кулачкового механизма позволяет осуществлять дозированную подачу топлива в аккумулятор давления (common-rail) при каждом цикле вращения распределительного вала. Регулирование параметров топливоподачи реализуется блоком управления двигателем (ECU), контролирующим работу системы в реальном времени. Электронный блок управления (ЭБУ) управляет открытием форсунок (injector) с помощью электро- или пьезогидравлического механизма, что позволяет точно контролировать количество и момент впрыска топлива для оптимального сгорания в цилиндре [45, 20]. Блок управления получает сигналы с датчиков положения коленчатого и распределительного валов, что позволяет точно отслеживать фазы и регулировать процесс впрыска топлива.

Блок управления двигателем регулирует параметры системы впрыска в зависимости от текущих условий работы двигателя [47].

В системе управления дизельным двигателем, блок управления получает информацию от множества датчиков, что позволяет точно регулировать начало впрыска и объем подаваемого топлива. Ключевыми параметрами, используемыми электронным блоком управления являются: частота вращения коленчатого вала двигателя; положение коленчатого вала (датчик Холла); положение педали акселератора; количество воздуха, поступившее в цилиндр (или абсолютное давление во впускном коллекторе); температура охлаждающей жидкости и воздуха; давление воздуха и топлива; кислородный датчик (лямбда-зонд).

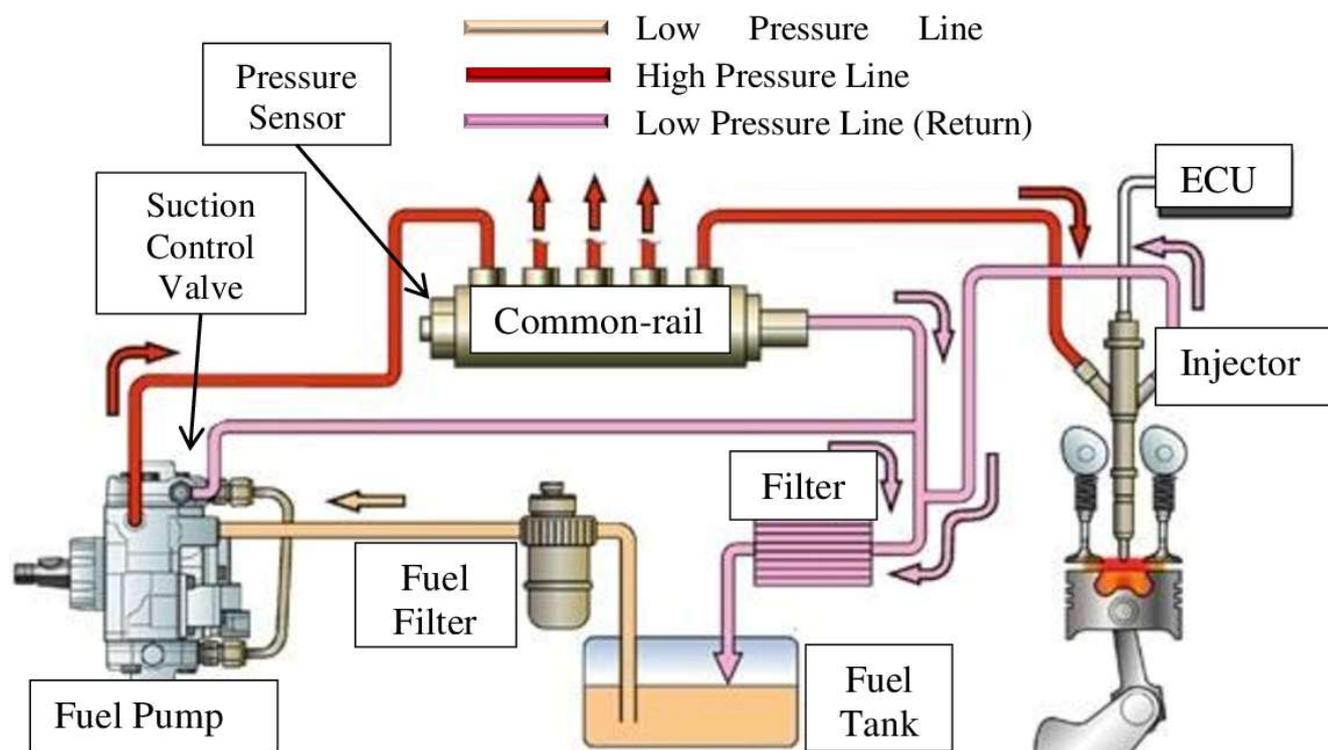


Рисунок 1.7 – Схема системы впрыска топлива Common Rail.

На основании данных с датчиков ЭБУ управляет системой впрыска, корректируя давление топлива и длительность впрыска, в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя и его текущей нагрузки. Например, в режиме холостого хода давление впрыска минимально, чтобы снизить шум и износ элементов ТА и двигателя, а при ускорении оно увеличивается для улучшения отклика двигателя и повышения его мощности [51].

Переход на систему питания Common Rail в дизельных двигателях представляет собой значительный шаг вперёд по сравнению с традиционными системами впрыска. Во-первых, мощность двигателя увеличивается за счёт того, что система Common Rail позволяет более точно и гибко регулировать параметры впрыска топлива [48]. Во-вторых, экологичность работы двигателя значительно улучшается.

Основными недостатками системы Common Rail являются сложность обслуживания и высокая требовательность к квалификации технического персонала. [50]. Повышение интенсивности горения топлива в аккумуляторных

системах вызывает значительное повышение температуры компонентов двигателя по сравнению с двигателями, оснащёнными традиционными системами подачи топлива. Что, в свою очередь, создаёт повышенные тепловые нагрузки на моторное масло.

При работе с классическим дизелем с непосредственным впрыском температура поршневой головки колеблется в пределах 320–350 °С, в то время как в двигателях, использующих систему Common Rail, она превышает 400 °С. Это приводит к тому, что моторное масло выгорает и окисляется значительно быстрее, чем в классических дизелях. В результате масла подвергаются более сильным термическим и окислительным нагрузкам, что может привести к снижению их эффективности и быстрой деградации [49].

Низкая ремонтпригодность компонентов и высокая чувствительность к качеству топлива являются значительными недостатками как систем топливоподачи с насос-форсункой, так и Common Rail. Системы требуют высококачественного топлива, поскольку попадание в систему загрязнений или воды может привести к повреждению чувствительных элементов, таких как форсунки и насосы высокого давления [27].

Система Common Rail продолжает набирать популярность, и на данный момент около 83% всех выпускаемых дизельных двигателей оснащены именно такой системой, что значительно превышает показатель 2008 года, когда доля составляла лишь 24%. Система получила признание благодаря эффективности, повышению экологичности и экономичности работы двигателя.

На рынке представлены несколько ведущих производителей системы, включая BOSCH, DELPHI, DENSO и SIEMENS [21]. Каждый из брендов разработал свою версию технологии, но все они обеспечивают высокую степень точности и контроля за процессом впрыска топлива, что улучшает характеристики работы дизельных двигателей.

Сегодня система Common Rail является одной из самых распространённых и надёжных для использования в дизельных двигателях легковых автомобилей.

Несмотря на высокую эффективность и надёжность системы Common Rail,

срок службы и качество работы напрямую зависят от правильной эксплуатации, а также от регулярного выполнения необходимых регламентных работ по техническому обслуживанию и текущему ремонту (ТР) [52].

В рамках настоящего исследования предполагается создание метода, направленного на предотвращение превышения дымности отработавших газов при эксплуатации автотранспортных средств с дизельными двигателями внутреннего сгорания. Экспериментальная часть работы осуществлялась на базе Акционерного общества «Автопарк № 1 «Спецтранс».

Данное предприятие обладает парком более 400 специализированных транспортных единиц, прошедших сертификацию для выполнения работ по транспортировке твёрдых коммунальных, промышленных и строительных отходов. Кроме того, инфраструктура организации включает в себя современный комплекс ремонтных мастерских, обеспечивающий техническое обслуживание подвижного состава, а также собственную автозаправочную станцию, что позволяет создавать эффективные условия для бесперебойной работы автопарка. В таблице 1.4 приведена информация о количестве подвижного состава.

Таблица 1.4 – Наличие подвижного состава АО «Автопарк № 1 «Спецтранс» по пробегу

Марка, модель	Наличие подвижного состава на 01.01.2023г.
MAN TGS 26350	56
Volvo FM 12	42
Isuzu ELF	66

Так как исследование является наиболее актуальным для автомобилей экологического класса евро 4, для дальнейшего изучения зависимости износа форсунок и дымности выхлопных газов был выбран автомобиль *Isuzu ELF*. На данном транспортном средстве установлен двигатель модели *4HJ1*.

Двигатель *Isuzu* (Исузу) *4HJ1* - четырёхтактный дизельный агрегат с верхним расположением распредвала (SOHC), что обеспечивает высокую эффективность работы.

Охлаждающая система двигателя выполнена в закрытом типе с принудительной циркуляцией жидкости. Двигатель оснащён ТНВД с регулятором давления, а топливная система представляет собой аккумуляторную систему подачи топлива, известную как Common Rail.

Изучим топливоподающую аппаратуру, используемую в системе впрыска Common Rail. На рисунке 1.8 представлена стандартная схема электрогидравлической форсунки двигателя, использующего систему питания Common Rail.

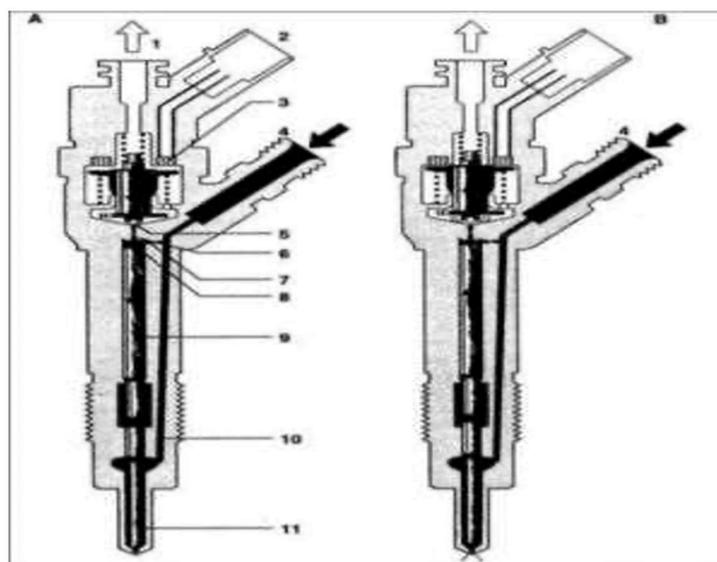


Рисунок 1.8 – Топливная электрогидравлическая форсунка двигателя с системой питания Common Rail

Где 1 - возврат топлива; 2 - электрический разъем; 3 - пусковой элемент (электромагнитный клапан); 4 - вход топлива от аккумулятора давления; 5 - шариковый клапан; 6 - отверстие утечки; 7 - отверстие подачи; 8 - отсек управления клапаном; 9 - плунжер управления клапаном; 10 - канал подачи топлива к распылителю; 11 - игла распылителя.

Основная задача форсунки — точно и эффективно подавать топливо в камеру сгорания в заданный момент времени, что необходимо для оптимизации работы двигателя.

Работа форсунки начинается с того, что ЭБУ, получая информацию о текущем состоянии двигателя (частота вращения коленчатого вала, нагрузка,

температура и другие параметры), посылает сигнал на электромагнитный клапан (ЭМ) форсунки. Диаграмма работы форсунки представлена на рисунке 1.9.

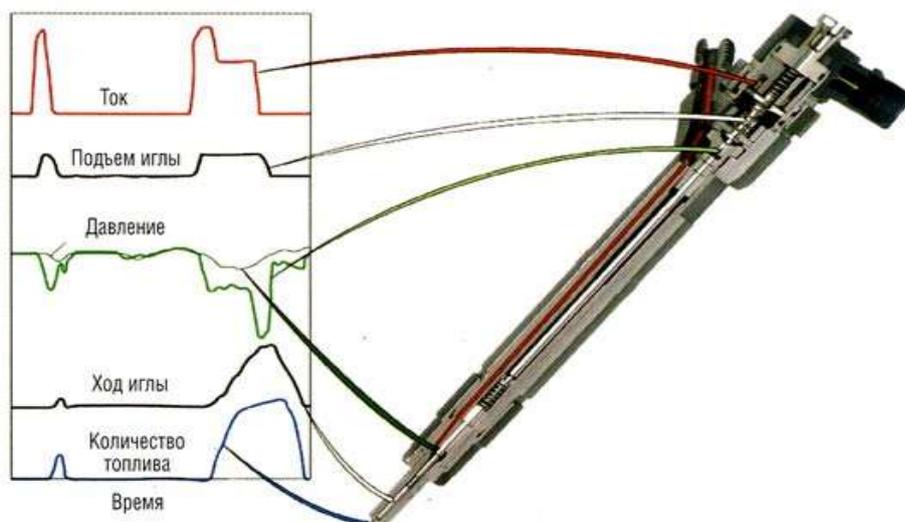


Рисунок 1.9 – Диаграмма работы форсунки

Форсунка включает несколько ключевых компонентов, каждый из которых выполняет свою функцию для обеспечения эффективного впрыска топлива:

- распылитель;
- гидравлическая система;
- электромагнитный клапан.

Форсунка управляет подачей топлива в камеру сгорания с использованием комбинации гидравлического и электромагнитного механизмов. Топливо под давлением поступает из аккумулятора высокого давления через канал к распылителю и далее в камеру управления. Камера связана с электромагнитным клапаном, который получает сигнал от ЭБУ. Когда электромагнитный клапан закрывается, отверстие утечки в камере управления тоже закрывается, суммарное давление на верхний торец иглы становится больше, чем давление на конусный торец, что приводит к закрытию иглы и прекращению подачи. Когда клапан открывается, отверстие утечки открывается, давление в камере управления снижается, и игла распылителя открывается, позволяя топливу поступать в камеру сгорания.

Количество топлива, необходимое для управления открытием иглы

распылителя, подаётся одновременно с топливом, которое требуется для подачи в цилиндр. Топливо проходит через отверстие утечки, связанное с клапаном, и возвращается в топливопровод. Дополнительно часть топлива теряется в направляющих толкателя клапана и самой игле распылителя [20].

Более прогрессивным и сложным устройством для впрыска топлива в дизельный двигатель считается пьезоэлектрическая форсунка (пьезофорсунка). Преимущества пьезофорсунки заключаются в высокой скорости срабатывания, которая в четыре раза быстрее, чем у электромагнитных клапанов, позволяет производить до 9 впрысков за один рабочий цикл. [52]. В результате, пьезофорсунки способны осуществлять устойчивое многофазовое впрыскивание, с минимальными порциями предварительного впрыскивания, сокращая промежуток времени между предварительным и основным впрысками, что существенно улучшает характеристики сгорания.

Кроме того, пьезофорсунки обладают компактной конструкцией [53; 54]. Увеличение КПД форсунки обеспечивается также за счёт того, что они требуют меньших затрат на управление по сравнению с электрогидравлическими форсунками.

Сложность конструкции пьезофорсунки приводит к сложной взаимосвязи процессов, происходящих в работе. Из-за этого гидродинамическая система пьезофорсунки имеет узкий диапазон значений структурных параметров, в котором она работает эффективно [55, 56, 57].

1.3 Анализ неисправностей топливной аппаратуры и их влияния на работоспособность и экологические показатели дизельных двигателей

Существующий парк подвижного состава в последние годы постоянно развивается; вносятся конструктивные изменения, ужесточаются требования к ремонтпригодности и надёжности, и соответствующим образом меняются требования, относящиеся к разработке, обслуживанию и эксплуатации.

В соответствии с требованиями ГОСТ 27.002–2015, надёжность определяется как одна из характеристик механизма – его способность сохранять в заданных пределах значения всех параметров, установленных нормативной документацией, обеспечивающие возможность выполнять заданные функции в соответствующих режимах и условиях эксплуатации, сохраняя при этом в рамках допустимых значений эксплуатационные показатели [23, 46, 105, 106].

В любом АТС двигатель представляет собой один из ключевых компонентов, от работы которого зависит способность всей машины осуществлять функции, в соответствии с ее назначением. Надёжность дизельного двигателя зависит от качественных характеристик ТА (топливной аппаратуры). У АТС различных марок статистика отказов двигателя вследствие неисправного состояния топливной аппаратуры составляет 20–50 процентов [107, 108, 109, 110]. Мощность такого двигателя, уровень потребления топлива и бесперебойная работа определяются именно исправностью топливной аппаратуры. Корреляция между надёжностью ТА и частыми отказами дизеля подтверждается целым рядом исследований [111, 112, 113, 114].

Снижение эксплуатационных показателей дизельного двигателя, связанное с некачественным функционированием ТА, согласно статистике, таково: снижение производительности – до 70%; снижение мощности – до 20%; излишний расход топлива – до 25%.

Состав отработавших газов в дизельном двигателе зависит от ряда факторов, среди которых наибольшее значение имеют: динамика воздушного потока; опережение впрыска; давления топлива; температура в камере сгорания; средний диаметр капель и их распределение по объёму камеры сгорания; концентрация кислорода.

Также следует учитывать повышенное сажеобразование в условиях плохого распыления топлива и снижения количества кислорода, тогда как при повышении концентрации кислорода и высокой температуре сгорания топлива образование NO_x усиливается. На рисунке 1.10 схематически представлен химический состав ОГ дизельного двигателя.

Неустойчивая работа и падение мощности двигателя, заметные для водителя, неизбежно возникают при нарушениях работы турбины или системы подачи воздуха. Подобные неисправности можно выявить также за счёт применения предусмотренных средств самодиагностики.

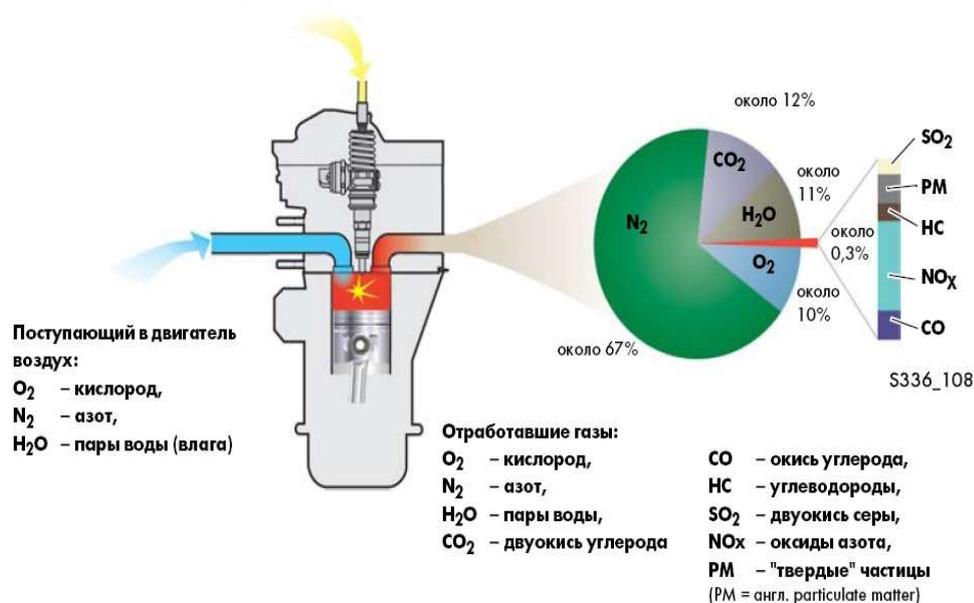


Рисунок 1.10 – Состав отработавших газов дизельного двигателя

В свою очередь, нарушения функционирования топливных форсунок зачастую не приводят к заметным изменениям в работе ДВС в течение долгого периода, хотя всё это время нарушается процесс образования смеси – возрастают показатели температуры сгорания и расхода топлива, смесь сгорает не в полном объёме, на поршне возникают отложения, масляная плёнка на поверхности цилиндра разрушается и т.д. Кроме того, вследствие повышения нагрузки на системы нейтрализации отработавших газов, их ресурс заметно снижается, возрастает негативное воздействие на окружающую среду.

Наиболее распространены два типа неисправностей в системе топливных форсунок: механический (гидроабразивный) износ компонентов и сбой в работе электромагнитного клапана или заедание иглы распылителя. Указанные дефекты

вызывают нарушение точности дозирования топлива, что, в свою очередь, приводит к изменениям процесса сгорания внутри камеры.

Системы самодиагностики автомобилей Isuzu ELF фиксируют отклонения в параметрах работы форсунок, после чего блок управления двигателем начинает корректировать время их открытия путём его увеличения или уменьшения. При этом даже при выходе характеристик форсунок за пределы регулировочного диапазона индикация неисправностей на панели приборов не осуществляется, что может способствовать продолжению эксплуатации двигателя при повышенных нагрузках на протяжении длительного периода времени. Данный алгоритм работы ЭБУ характерен и для других дизельных двигателей с электронным управлением впрыском.

Неравномерная подача топлива во все цилиндры двигателя становится причиной его нестабильной работы на холостом ходу, возникновения провалов в работе отдельных цилиндров и значительного увеличения уровня вибрации агрегата.

Экологичность дизельного двигателя и эффективность его работы напрямую зависят от давления подачи и качества распыления топлива, при этом наличие твердых частиц в топливе приводит к быстрому переходу форсунок к неисправному состоянию. В исследованиях закономерностей подачи и распыления топлива большая работа проделана иностранными и отечественными учёными: Ackermann M. (Германия), Chen L. (Китай), Davies N. (Великобритания), Guo Y. (Китай), Heywood J.B. (США), Li W. (Китай), Milovanović S. (Сербия/Европа), Onorati A. (Италия), Paugí F. (Испания), Qin Y. (Китай), Reitz R.D. (США), Sun T. (Китай), Thompson R. (США), Wang F. (Китай), Xu H. (Китай), Zhang J. (Китай), Астахов И.В., Баранов П.А., Башта Т.М., Богданов А.С., Борычев С.Н., Бышов Н.В., Васильев В.А., Голубев И.Г., Грехов Л.В., Гуревич М.Л., Дмитриев А.М., Зайцев Е.А., Загородских Б.П., Жуковский Н.Е., Ковалёв А.Ю., Кокорев Г.Д., Кравченко А.М., Кузнецов Т.Ф., Марков В.А., Михайлов В.Д., Романов С.А., Смирнов А.В., Тришкин И.Б., Трусов В.И.,

Успенский И.А., Файнлейб Б.Н., Харитонов А.И., Чёркасов Д.М., Шемякин А.В., Щербаков В.П.

В ходе технического обслуживания топливной аппаратуры проводится комплекс восстановительных мероприятий, включающий как регулировку существующих узлов, так и замену вышедших из строя элементов на новые. Для обеспечения работоспособности и надёжности системы питания необходимо точное определение технического состояния и своевременное оказание технического воздействия [115, 116, 117].

Признаками изменения технического состояния системы питания можно считать повышение расхода топлива, повышение токсичности отработавших газов, снижение мощности и другое [111, 112, 118, 119].

Топливная аппаратура современного дизельного двигателя представляет собой сложную техническую систему, надёжность которой может быть оценена через анализ показателей, определяющих отклонение выходных параметров от установленных нормативных значений (основных технических характеристик) [120, 121, 122, 123].

В современных системах управление характеристиками подачи топлива осуществляется программным обеспечением электронного блока управления двигателем, которое нацелено на оптимизацию процессов распыливания, смесеобразования и сгорания топлива для каждого конкретного режима работы агрегата [27].

Определение оптимальных характеристик топливоподачи представляет собой сложную задачу, требующую учёта множества динамически изменяющихся факторов. К числу таких параметров относятся продолжительность впрыска топлива и давление топлива, при этом предъявляемые к ним требования часто носят противоречивый характер.

Согласно данным различных исследований, топливная аппаратура является одним из наиболее нагруженных узлов современного дизельного двигателя, подверженным высоким механическим и термическим нагрузкам [139, 140, 141, 142, 143, 144, 145].

Одним из основных признаков нарушения указанных процессов является повышенный расход топлива, что подтверждается результатами исследований, согласно которым перерасход топлива на автотранспортных предприятиях может составлять до 40%. Это приводит к соответствующему увеличению выбросов с отработавшими газами. Такой перерасход можно предотвратить при своевременном выявлении изменения технического состояния топливной аппаратуры. Проанализировав статистические данные об отказах и неисправностях, связанных с топливной аппаратурой, можно сделать вывод о том, что большинство из них относятся к топливным форсункам [146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155].

На рисунке 1.11 представлена статистика причин повышения дымности у дизельных автомобилей с системой Common Rail (в процентах), основанная на анализе данных сервисных центров, технических исследований и экспертных оценок.

Неисправности топливной аппаратуры условно можно разделить на два вида. При неисправностях первого вида дальнейшая эксплуатация двигателя чаще всего невозможна. Примером может служить отказ ТНВД, который может возникнуть по ряду причин [156, 157, 158, 159, 160, 161, 162]:

- повреждение распределительного вала;
- неисправность подшипников распределительного вала;
- задиры и заклинивание плунжеров ТНВД;
- срез шпонки шлицевой втулки привода насоса и др.

При неисправностях второго вида возможно продолжение эксплуатации транспортного средства, однако при этом снижается мощность, ухудшаются экологические и экономические показатели работы двигателя. Согласно исследованию, проведённому в МАДИ, до 90% отказов топливной аппаратуры современных дизельных двигателей вызваны эксплуатационными факторами – использование топлива низкого качества или топлива с примесями или несвоевременной заменой топливного фильтра.



Рисунок 1.11 – Статистика причин повышения дымности у дизельных автомобилей с системой Common Rail (в процентах), основанная на анализе данных сервисных центров, технических исследований и экспертных оценок

Причинами неисправности топливных форсунок в большинстве случаев выступают:

1. при наличии электрогидравлической форсунки – поломка ЭМ-катушки;
2. дефекты поверхностей управляющего клапана, как посадочных, так и запирающих;
3. дефекты поверхности рабочего конуса иглы, а также места посадки форсунки в распылителе;
4. образование на поверхности распылителя и корпусе управляющего клапана загрязнений и отложений;
5. термические и кавитационные нарушения поверхности распылителя;
6. нарушение формы отверстий распылителя [58, 161, 162, 163, 164, 160, 165].

Согласно результатам различных исследований именно топливные форсунки являются компонентом, лимитирующим надёжность современного дизельного двигателя [20].

1.4 Анализ возможностей бортовых и внешних инструментов диагностирования топливной аппаратуры Common Rail

Система управления двигателя (СУД) содержит датчики, управляющее устройство (УУ), исполнительные механизмы (приводы) и подсистему подачи топлива.

Датчики предназначены для выдачи информации в управляющее устройство. Обязательной для любой СУД является информация:

- о положении коленчатого вала (верхней мёртвой точки 1-го цилиндра) - эта информация необходима для определения УОЗ (для бензиновых двигателей) и угла опережения впрыска (для дизельных двигателей);
- о частоте вращения коленчатого вала, что влияет на корректировку таких показателей, поддержание оборотов на холостом ходу, дозировка топлива при торможении и высоких оборотах, угол опережения впрыска;
- об объёме воздуха, который всасывается двигателем, что необходимо для формирования состава топливо-воздушной смеси, а также для определения нагрузки на двигатель;
- о температуре охлаждающей жидкости - для определения температуры двигателя;
- о температуре воздуха - для расчёта массы всасываемого воздуха;
- о количестве избыточного кислорода в отработавших газах - в системах с обратной связью по составу смеси и нейтрализатором отработавших газов;
- о включении зажигания - для предварительного включения топливного насоса в большинстве систем. Могут использоваться и дополнительные

датчики. Так, например, о температуре топлива - в жарких странах, об атмосферном давлении - в высокогорных.

Управляющее устройство (УУ) служит для приёма, оценки и обработки информации от датчиков, расчёта управляющих воздействий и их отправки на исполнительные механизмы. Электронные УУ, кроме того, осуществляют адаптацию к состоянию двигателя, самодиагностику некоторых параметров самого УУ, исполнительных механизмов и датчиков, а при некоторых их поломках обеспечивает аварийный режим работы двигателя, позволяющий водителю без особых проблем добраться до ближайшей СТО.

ЭБУ чаще называют контроллером (control - англ. - управление). ЭБУ первых электронных систем впрыска топлива (СВТ) (например, L-Jetronic) были аналоговыми. Современный контроллер представляет из себя сложное электронное цифровое микропроцессорное устройство. Он содержит входы (АЦП), микропроцессор, оперативную и постоянную память (ОЗУ и ПЗУ), выходы (ЦАП и мощностные каскады), блок кодовой самодиагностики. ПЗУ прошивается на заводе-изготовителе и содержит матрицы топливо-дозирования и зажигания конкретного двигателя, контрольные параметры датчиков, исполнительных механизмов и двигателя для сравнения их с реальными, адаптивирования и выдачи кодов самодиагностики в случае признания несоответствия как поломки. Некоторые датчики при поломке могут быть "заменены" величинами, извлекаемыми из ПЗУ, однако эта "замена" хотя и существенна, но все же носит ограниченный характер. Так, например, если сопротивление датчика температуры охлаждающей жидкости (ДТОЖ) не соответствует температуре, но при этом не вышло за свои крайние пределы, то контроллер не признает его неисправным, и характеристики двигателя существенно ухудшаются.

Только в случае выхода сопротивления ДТОЖ за пределы контролируемых параметров, он признается неисправным, и "заменяется" заранее вписанной в ПЗУ постоянной величиной, соответствующей прогретому двигателю т.е. горячий двигатель будет работать хорошо, но возникнут проблемы с холодным пуском и

прогревом. Некоторые продвинутые системы производят "замену" для 400°C и 800°C, но это не снимает проблему в целом.

Невзирая на бурное развитие средств самодиагностики, они также не снимают проблему диагностики в целом. Так, кодовое диагностирование способно оценить только несоответствие электрических параметров, и то зачастую в крайних случаях (обрыв, короткое замыкание, выход за контролируемые пределы). В то же время характеристики системы во многом зависят от состояния механических и гидравлических параметров, не контролируемых системой самодиагностики. Так, например, форсунка проверяется только по параметру "сопротивление обмотки", куда входит и состояние цепи до обмотки. Вместе с тем форсунка только тогда является исправной, когда соответствует целому ряду других важнейших параметров: производительность, внутренняя и внешняя герметичность по топливу, герметичность по воздуху, качество распыла, ток включения, ток удержания, ток выключения и другие. То есть, 90% параметров остаётся вне контроля со стороны системы самодиагностики, и это касается не только форсунок. Очень часто, будучи не в состоянии описать непредусмотренную поломку, система самодиагностики выдаёт не один, а несколько кодов одновременно, указывая на поломку многих узлов, что вводит диагностов в заблуждение. Даже при выдаче одного кода диагноз часто остаётся неопределённым.

Своевременное диагностирование элементов системы питания позволяет снизить количество выбросов в окружающую среду, снизить интенсивность отказов и сократить расходы на эксплуатацию. Большая часть существующих методов диагностирования подразумевает снятие форсунок с дизельного двигателя для проверки на стенде, установку дополнительного оборудования на линию высокого давления, измерение в обратной магистрали объёма топлива.

На отечественном авторынке диагностирование состояния форсунок аккумуляторного впрыска топлива чаще всего обеспечивается с помощью стендов таких моделей, как М-108, М-107Э CR, BOSCH ESP 200, CR-NT815 и др.; для определения показателей цикловой подачи топлива используются прямой и

мензурочный методы. При этом неточности, связанные со вторым из них, обусловлены топливным осадком на стенках мензурок, образованием пены, а также тем, что при снятии показаний возможна субъективная интерпретация результатов.

Прямой (безмензурочный) метод обеспечивает более высокую точность результатов; расходомер, используемый при применении данной методики, может быть либо объёмным, либо поршневым, причём во втором случае оборудованию присущ ряд недостатков, таких, как высокий уровень инерционности (вследствие чего отдельные впрыски не могут отслеживаться) и впрыск тестовой жидкости при сопротивлении среды из-за атмосферного давления. Оценка бесперебойности подачи затруднена по причине инерционности, т.е. показатели цикловой подачи определяется только по среднему значению. Оценка показателей впрыска с помощью объёмных расходомеров осуществляется за счёт подачи тестовой жидкости в замкнутую ёмкость, заполненную тестовой жидкостью, сжимаемость которой и обеспечивает функционирование расходомера. В камере такой расходомер создаёт при впрыске близкое к показателям цилиндра противодействие, что позволяет получить точные результаты за счёт приближённости стендовых условий работы форсунки к условиям в ходе эксплуатации двигателя. Быстродействие таких расходомеров даёт возможность определять бесперебойность цикла подачи, одновременно обнаруживая недостатки функционирования форсунок.

Те же решения используются на диагностических стендах для оценки форсунок топливной системы «Common Rail», конструкция которых в большинстве случаев включает следующие элементы:

- ТНВД с электроприводом;
- ёмкость для тестовой жидкости (бак);
- расходомер высокой точности (электронный);
- контроллер, оснащённый ПО для создания подаваемых на форсунки импульсов;

- оборудование, обеспечивающее стабилизацию температурных показателей.

На рисунке 1.12 приведена примерная конструкция вышеописанного диагностического стенда:

Основная функция такого оборудования состоит в определении при функционировании форсунок ключевых показателей, а именно: производительности, быстродействия, характеристик подаваемого на ЭМ-клапан управления сигнала, расхода топлива на управление, сопротивления обмотки катушки клапана, температуры топлива при перепуске, продолжительности задержки при срабатывании клапана. Форсунки управляются за счёт генерирования создаваемых и управляемых с помощью специального программного обеспечения (ПО) силовых импульсов (т.е. управление осуществляется с ПК). В представленной системе клапаны давления и расхода управляются независимым регулятором [59].



Рисунок 1.12 – Пример конструктивного исполнения стенда для проверки топливных форсунок системы топливоподачи Common Rail.

Помимо диагностирования топливной аппаратуры на стендах в различных исследованиях встречаются также и другие методы без снятия форсунок с

двигателя [64]. Для реализации этих методов применяют сочетание диагностического сканера и различных комплектов для диагностирования систем Common rail, например, комплекс для диагностирования «Common Rail Tester» [64].

Также в различных исследованиях описывается газоаналитический метод диагностирования топливopодающей аппаратуры дизеля. [101] В этом методе техническое состояние топливной аппаратуры определяется по показателям дымности и содержания CO₂ в отработавших газах.

В работе [65] предложена методика диагностирования пьезоэлектрических форсунок без демонтажа, с помощью анализа следующих диагностических параметров:

- коррекция цикловой подачи топлива;
- калибровка нулевой подачи;
- параметры управляющего импульса;
- сопротивление форсунки;
- расход топлива на управление.

Схожие с перечисленными выше разборные и безразборные методы описываются также в работах [66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73]. Следует отметить, что каждый из этих методов требует снятия автомобиля с линии, проведения работ по снятию и установке топливной аппаратуры или дополнительного оборудования, или проверку автотранспортного средства на специальных стендах, что влечёт за собой дополнительные затраты, а также может снижать ресурс элементов ТА.

Поэтому, для автомобилей экологического класса 4 и ниже, а также для автомобилей более высокого экологического класса с неисправными системами снижения токсичности отработавших газов, требуется новый подход к определению технического состояния топливных форсунок, обеспечивающий соблюдение требований к дымности отработавших газов и не предполагающий вывода транспортного средства из эксплуатации. Этот подход может быть реализован посредством метода, в основу которого положен непрерывный контроль параметров, используемых электронным блоком управления

двигателем. Таким образом, разработка указанного метода основывается на исследовании зависимости параметров подачи топлива от характеристик распылителя топливной форсунки.

Выводы первой главе

Результаты анализа структуры парка АТС в РФ и нормативных документов, которыми устанавливаются требования к дымности отработавших газов дизельных двигателей, а также анализ конструкции и методов диагностирования систем питания дизельных двигателей, обуславливают следующие выводы:

1. Рост парка автотранспортных средств в Российской Федерации при продолжающей сохраняться значительной доле транспортных средств низких экологических классов создает предпосылки для усиления негативного влияния АТС на окружающую среду, в частности АТС с дизельными двигателями.

2. Действующими нормативными документами предусмотрены мероприятия по предупреждению эксплуатации транспортных средств с нарушением требований выбросам загрязняющих веществ с отработавшими газами, однако они требуют вывода транспортных средств из эксплуатации, а также проводятся с большой периодичностью, что делает их недостаточно эффективными.

3. Основными причинами, снижающими экологические показатели эксплуатации АТС с дизельными двигателями, являются неисправности топливной аппаратуры, в частности – неисправности топливных форсунок.

4. Д 80% современных АТС с дизельными двигателями, находящихся в эксплуатации, оборудованы системой подачи топлива Common Rail, предполагающей частичный демонтаж основных элементов конструкции перед проведением диагностирования для подключения дополнительных механизмов или монтажа компонентов системы подачи топлива на диагностические стенды, что также предполагает значительные простои.

5. Оборудование, используемое для диагностирования систем подачи топлива Common Rail, не обеспечивает требуемой точности показаний, а бортовые системы самодиагностики могут допускать эксплуатацию АТС с неисправностями топливной системы без ее индикации.

6. Ввиду этого перспективным направлением в данной сфере является разработка нового метода повышения экологической безопасности, предупреждающего нарушение требований к дымности отработавших газов при эксплуатации автомобильного транспорта с дизельными двигателями, основанного на непрерывном контроле параметров, используемых электронным блоком управления двигателем.

Для реализации обозначенной цели сформулируем следующие основные задачи настоящего исследования:

1. На основе анализа возможности контроля дымности отработавших газов по параметрам, используемым электронным блоком управления, обосновать введение соответствующего диагностического параметра, зависящего от износа сопловых отверстий распылителя форсунки и являющегося параметром рабочего процесса, используемым электронным блоком управления.

2. Установить зависимость дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от значений введенного диагностического параметра

3. Разработать метод повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельным двигателем на основе контроля значений введенного диагностического параметра.

4. Предложить решения по практическому использованию разработанного метода и оценить экономический эффект от его применения.

2. ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ДЫМНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ЭЛЕКТРОННЫМ БЛОКОМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ

2.1 Концепция метода повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями

Анализ статистических данных о структуре и возрасте подвижного состава показывает, что значительное количество транспортных средств, эксплуатируемых в крупных городах, находящихся в собственности как физических, так и юридических лиц, имеют экологический класс не выше евро 4 и средний возраст более 10 лет. Исходя из этого представляется возможным говорить о значительном вкладе автомобильного транспорта в формировании выбросов, загрязняющих окружающую среду. Влияние этих выбросов на окружающую среду и здоровье человека отражено в ряде работ следующих авторов: Ладной Е.В., Бондарева З.З., Трофимова И.А., Замкова Г.Е., Маслова С.А., Рубайло В.Л., Хегай Ю.А., Зотова Л.Л., Невмержицкого Н.В., Тойлыбаева А.Е., Бекжанова Т.К., Кулотаева Ж.О., Allen, D. T. (США) , Borken-Kleefeld, J. (Австрия) , Faiz, A. (США) , Harrison, R. M. (Великобритания) , Klimont, Z. (Австрия) , Lelieveld, J. (Германия) , Maji, K. J. (Индия) , Minjares, R. (США) , Pandey, A. (Индия) , Ramanathan, V. (США) , Singer, B. C. (США) , Wang, H. (Китай) , Zhang, Q. (Китай)

Значительный вклад в развитие технологий и методов исследования топливной аппаратуры дизельных двигателей, охватывая широкий спектр направлений, от моделирования процессов сгорания до разработки современных систем диагностирования и оптимизации работы топливных систем внесли учёные из разных стран: Ackermann, M. (Германия), Caton, J. A. (США), Duret, P. (Франция), Hashimoto, T. (Япония), Heywood, J. B. (США), Huang, Z. (Китай),

Ishida, M. (Япония), Johansson, B. (Швеция), Lee, C. S. (Южная Корея), Lebrun, M. (Бельгия), Lu, X. (Китай), Onorati, A. (Италия), Payri, F. (Испания), Reitz, R. D. (США), Schwarz, C. (Германия), Stone, R. (Великобритания), Zhao, H. (Великобритания), Zhen, H. (Китай). В отечественной науке эти вопросы решали Алексеев В.В., Астахов И.В., Баранов А.А., Белов П.М., Борычев С.Н., Брилинг Н.Р., Бурячко В.Р., Бышов Н.В., Вырубков Д.Н., Гаврилов А.Н., Голубков Л.Н., Добряков А.И., Дьяченко Н.Х., Ермаков С.С., Загородских Б.П., Карасёв В.П., Карунин А.Л., Кокорев Г.Д., Корнилов В.Г., Костина А.К., Кравченко А.М., Кузнецов А.Г., Лебедев А.В., Луканин В.Н., Мазинг Е.К., Медведев П.А., Михайлов А.К., Никитин Ю.И., Орлин А.С., Петров Д.В., Платонов В.Ф., Русинов Р.В., Сидоров К.Е., Смирнов Е.А., Тарасов Н.М., Трофимов В.И., Успенский И.А., Фанлейб Б.Н., Федоров Р.К., Филиппов А.Н., Харитонов Л.Б., Чернышев Г.Т., Шабанов А.В., Шемякин А.В., Эфрос В.М., Яковлев Д.В. Результаты их исследований позволяют сделать вывод о перспективности внедрения систем непрерывного контроля дымности. Эти системы базируются на постоянном отслеживании параметров, используемых электронным блоком управления, что обеспечивает своевременное выявление отклонений в работе топливной аппаратуры.

Таким образом, актуальность разработки механизмов для непрерывного контроля соблюдения экологических норм, предъявляемых к транспортным средствам в условиях современной эксплуатации на территории РФ, становится очевидной. Это особенно важно в контексте ужесточения экологических стандартов и необходимости минимизации негативного воздействия автотранспорта на окружающую среду. Создание таких систем позволит не только повысить экологическую безопасность, но и оптимизировать техническое обслуживание транспортных средств, снижая затраты на ремонт и диагностирование. Поскольку состав отработавших газов при эксплуатации АТС выступает ключевым требованием, относящимся к охране окружающей среды [9], для обеспечения системного контроля представляется целесообразным использование дополнительных датчиков, обеспечивающих прямой контроль

соответствующих показателей. Точное и своевременное выявление неисправностей обеспечивается за счёт прямого контроля содержания NO_x , C_xH_y и др., а также прочих загрязняющих атмосферу агентов установленной непосредственно в систему выпуска дополнительной измерительной аппаратурой; кроме того, такие датчики определяют уровень эффективности систем очистки ОГ.

На данный момент подобные механизмы активно разрабатываются; в частности, считается возможным переход от системы бортовой самодиагностики поколения OBDII к поколению OBDIII либо к OBM, т.е. подразумевающим применение дополнительных датчиков системам «бортового измерения», которые способны передавать данные о вероятности загрязнений пользователям всех уровней, вплоть до органов экологического надзора [11].

Система бортовой самодиагностики OBDII, реализованная в автомобилях, находящихся в эксплуатации, также может подходить для обеспечения постоянной проверки функциональности элементов системы выпуска и фиксирования данных при выявлении нарушений, что позволяет оперативно восстановить функционал. Диагностирование неисправностей при осуществлении контроля через OBDII обеспечивается за счёт выявления взаимосвязи выявленных нарушений, в частности отсутствия ожидаемых показателей или возникновения непрогнозируемых. Приводящие к нарушениям факторы только отчасти анализируются в рамках параметров окружающей среды (данные Freeze Frame). При использовании OBDII значительная часть управляющего программного обеспечения (ПО) отвечает за контроль состояния проводов (обрывы, короткие замыкания (КЗ)) датчиков и исполнительных механизмов и грубую проверку правдоподобности и достоверности сигналов датчиков. При этом:

1. Программное обеспечение электронных блоков управления (ЭБУ) в рамках OBDII не позволяет ни своевременно распознавать неисправности в области двигателя, ни делать выводы о причинах неисправностей.
2. Прогнозирование последующих неисправностей на основании наблюдаемых неисправностей также не производится.

У систем OBDII приняты предельные значения выявления нарушений, допускающие выбросы загрязняющих веществ при превышении максимальных показателей в рамках нормативов «Евро-2». Игнорирование сигналов системы со стороны водителя представляет собой, по сути, правонарушение в сфере охраны окружающей среды, поскольку выброс от его АТС превышает норму. Следует отметить наличие технической возможности обеспечения в подобном случае автоматической остановки АТС вплоть до устранения неисправности; однако на сегодняшний день для этого существуют правовые препятствия. Системы OBDII, применяющие возможности транспортной телематики, позволят передавать данные непосредственно контрольно-надзорным госорганам и структурам, выдающим разрешения на эксплуатацию транспортных средств. При использовании систем OBDII в качестве основной проблемы выступает состояние, при котором отсутствует превышение отдельных максимальных значений показателей загрязнения, однако общий объём выбросов превышает в результате функционирования на пределе пороговых значений различных систем конструкции, что не выявляется системой и, следовательно, не поддаётся контролю с ее стороны. Существует вероятность существенного превышения допустимых значений выбросов загрязняющих веществ с отработавшими газами при отсутствии выявления каких-либо неисправностей системой OBDII.

Ещё один значимый минус состоит в отсутствии в системе выпуска возможности определения показателей по отдельным стандартизированным составляющим выбросов, поскольку их прямая оценка электронным блоком управления не осуществляется, т.е. оценка является исключительно опосредованной [12].

В сравнении с OBDII, более перспективной является OBM (система бортового измерения «On-Board Measurement»), включающая дополнительные датчики в системе выпуска, за счёт чего обеспечивается прямой контроль состава выбросов. При использовании данной системы возможно определение содержания в отработавших газах углеводорода, NO_x , C_xH_y и др., параметры которых сопоставляются с нормативными. При отклонении показателей от

номинальных значений, как и при использовании OBDII, с помощью светового сигнала указывается на наличие неисправности (с указанием соответствующего кода).

За счёт непосредственного определения показателей содержания загрязнений, в данной системе, в отличие от системы OBDII, также могут быть выявлены неисправности, связанные с непрогнозируемыми нарушениями (их сочетаниями), что даёт возможность контроля функционирования новых систем очистки отработавших газов (накопительного катализатора, сажевого фильтра, SCR-катализатора), по которым достигаются максимальные значения при применении системы OBDII. Таким образом, можно констатировать более высокую эффективность системы OBM, в сравнении с OBDII, включая уровень эксплуатационной безопасности и технические издержки.

Одной из ключевых задач, стоящих перед европейскими странами в контексте устойчивого развития, является снижение негативного воздействия автотранспортных средств на окружающую среду. В последние десятилетия Европейский Союз активно внедряет строгие экологические стандарты, такие как серия нормативов Евро (Евро 5, Евро 6 и их последующие обновления), направленных на ограничение выбросов вредных веществ, включая оксиды азота (NOx), углеводороды (CH) и твердые частицы (PM). Однако достижение поставленных целей требует не только совершенствования технологий двигателей внутреннего сгорания (ДВС), но и разработки комплексных решений, охватывающих альтернативные виды топлива, электромобильность, а также системы мониторинга и контроля выбросов.

Одним из приоритетных направлений является переход на использование альтернативных источников энергии, таких как водородное топливо, биотопливо и электричество. Европейская комиссия активно поддерживает проекты по развитию инфраструктуры для электромобилей и водородных автомобилей, что отражено в программе "European Green Deal" (Европейский зеленый курс). В рамках данной инициативы планируется к 2030 году сократить выбросы парниковых газов на 55% по сравнению с уровнем 1990 года, а к 2050 году

достичь углеродной нейтральности. Для реализации этих целей вводятся стимулирующие меры, включая налоговые льготы для производителей экологически чистых транспортных средств, субсидии на приобретение электромобилей и развитие сети зарядных станций. Тем не менее, широкомасштабный переход на альтернативные источники энергии сталкивается с рядом вызовов, таких как высокая стоимость технологий, ограниченная доступность редкоземельных материалов для производства аккумуляторов и необходимость модернизации энергетической инфраструктуры.

Особую роль в повышении экологической безопасности играет регулирование выбросов для уже эксплуатируемых транспортных средств. По данным исследований, значительная часть выбросов вредных веществ приходится на старый автопарк, который не соответствует современным экологическим стандартам. Для решения этой проблемы Европейский Союз активно продвигает программы по стимулированию замены старых автомобилей на более экологичные модели, а также внедряет инициативы по модернизации систем очистки выхлопных газов на существующих транспортных средствах. Например, установка сажевых фильтров и систем селективной каталитической нейтрализации (SCR) становится обязательным условием для коммерческого транспорта в ряде стран ЕС.

Таким образом, решение проблемы повышения экологической безопасности транспортных средств в Европе требует комплексного подхода, включающего как технологические инновации, так и законодательные меры. Успешная реализация данных инициатив во многом зависит от уровня международного сотрудничества, инвестиций в научные исследования и готовности общества к переходу на новые, более экологичные технологии. При этом важно учитывать экономические и социальные аспекты, чтобы обеспечить равноправный доступ к экологически чистым транспортным решениям для всех слоёв населения. В современных научных исследованиях рассматриваются возможности применения измерительной аппаратуры для осуществления прямого контроля отработавших газов (ОГ) в процессе эксплуатации автотранспортных средств (АТС). Такой

подход обеспечивает высокую надёжность и достоверность показателей при проведении испытаний, включая условия динамического изменения объёма выбросов, а также при повышенных и продолжительных нагрузках. Выявление изменений в характеристиках выбросов осуществляется за счёт распознавания неисправностей в системах снижения токсичности ОГ. В частности, для мониторинга процессов сгорания непосредственно в камере сгорания, а также для оптимизации параметров расхода топлива и момента впрыска, может применяться метод измерения ионного тока. Этот метод позволяет формировать и передавать на блок управления сигналы, содержащие информацию о характеристиках процессов сгорания, уровне вредных выбросов и коэффициенте полезного действия (КПД).

На данный момент точные сроки практического внедрения системы On-Board Measurement (OBM) остаются неопределёнными [13]. Однако, по всей вероятности, её широкомасштабное использование станет возможным лишь в среднесрочной перспективе. Это обусловлено необходимостью внесения соответствующих изменений в законодательную базу, регулируемую экологические стандарты. Следует учитывать, что новое законодательство не будет распространяться на уже находящиеся в эксплуатации АТС. Кроме того, использование дополнительных датчиков, функционирующих в условиях повышенных температур и в потоке отработавших газов [14], повлечёт за собой увеличение стоимости транспортных средств. Также стоит отметить, что мировые автопроизводители уже сталкивались с обвинениями в фальсификации результатов проверки экологических характеристик своих автомобилей [15, 16].

Обеспечение экологической безопасности транспортных средств (ЭБТС) является ключевой задачей устойчивого развития, требующей комплексного подхода к минимизации антропогенного воздействия. В условиях роста числа транспортных средств и ужесточения экологических норм необходимость системного подхода к анализу ЭБТС становится всё более актуальной. В связи с этим был проведён системный анализ факторов обеспечения экологической безопасности транспортных средств. Их декомпозиция приведена на рисунке 2.1.

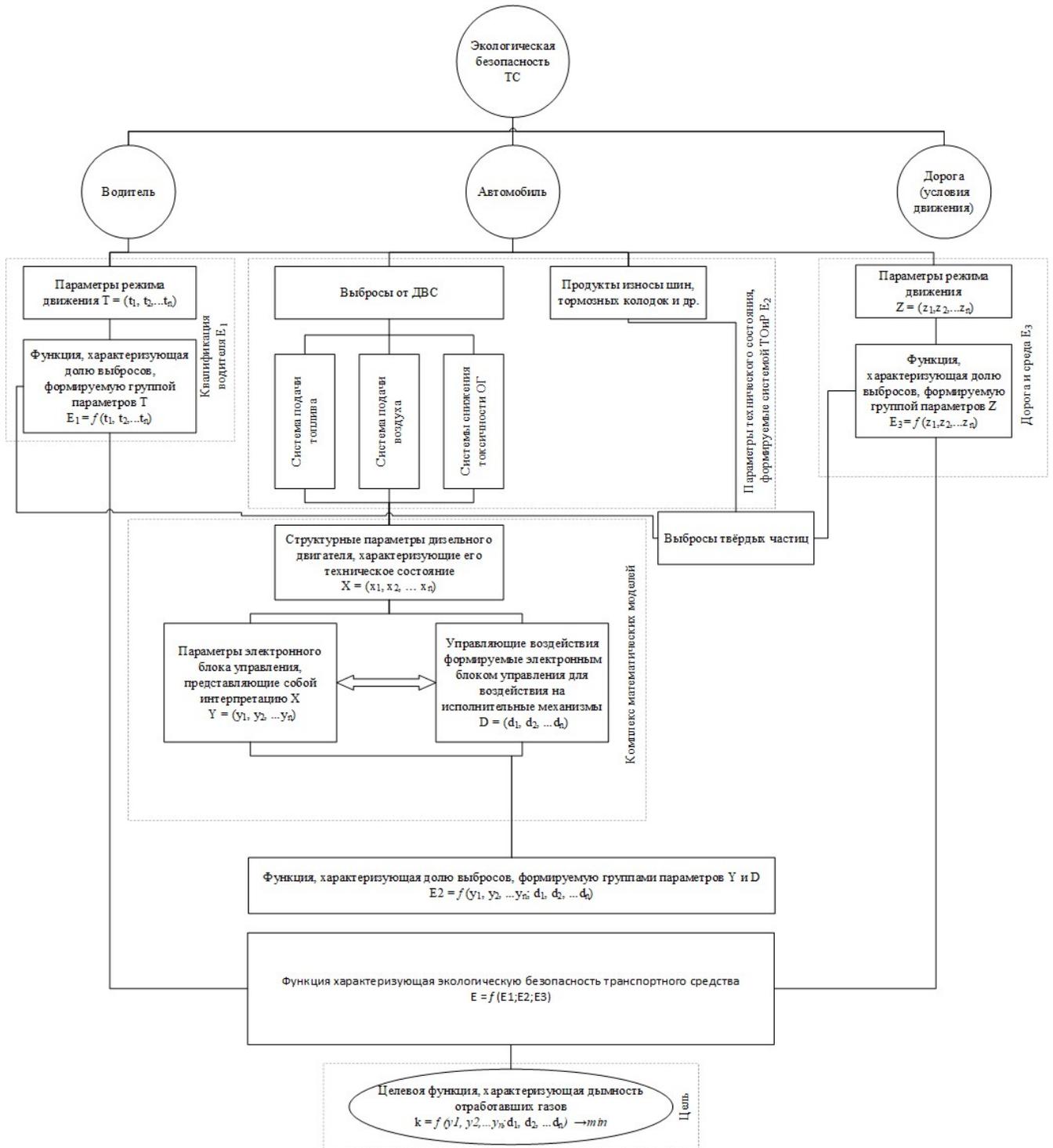


Рис. 2.1 – Декомпозиция ЭБТС

В рамках методологии системного анализа ключевые факторы ЭБТС декомпозируются на три подсистемы, формирующих 5 множеств параметров:

Параметры, связанные с поведением и навыками оператора транспортного средства (в традиционной терминологии – водителя) представлены группой параметров $T = (t_1, t_2, \dots, t_n)$;

Структурные параметры, характеризующие техническое состояние двигателя Представлены группой параметров $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

Параметры, используемые электронным блоком управления, являющиеся интерпретацией множества параметров X представлены группой параметров $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$;

Управляющие воздействия формируемые электронным блоком управления для воздействия на исполнительные механизмы представлены группой параметров $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$

Условия эксплуатации и внешней среды представлены группой параметров $Z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$.

Представленные группы параметров позволяют описать 3 подсистемы ЭБТС с помощью функций E_1, E_2, E_3 .

Подсистема $E1$ - водитель оказывает значительное влияние на ЭБТС через выбор режимов движения и соблюдение ПДД. Подсистема $E1$ описывается функцией $E_1 = f(t_1, t_2, \dots, t_n)$. Основные параметры этой группы представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные параметры группы параметров Т

№	Значение параметра	Описание и влияние
t_1	Скорость движения	Рост сил сопротивления движению по мере увеличения скорости (>80 км/ч) приводит к увеличению расхода топлива на 10–15% [187].
t_2	Ускорение/торможение	Частые резкие манёвры повышают износ тормозных колодок на 20% [188].
t_3	Стиль вождения	Резкие ускорения на 15–20% повышают выбросы NOx [187].
t_4	Использование интеллектуальных систем помощи водителю (ADAS)	ADAS обеспечивают движение в установившихся режимах, уменьшая выбросы на 8–10% [189].

Таблица 2.1 – Продолжение

t_5	Выбор скоростного режима и дистанции	Нарушение дистанции увеличивает частоту торможений (t_2).
t_6	Использование вспомогательных средств	Навигаторы с экономичными маршрутами сокращают пробег на 5–7%.
t_7	Время вождения	Усталость водителя снижает контроль над t_1-t_6 .
t_8	Планирование маршрута	Предварительное планирование маршрута снижает продолжительность простоев на холостом ходу (z_2).
t_9	Использование ручного режима передач	Увеличивает контроль над оборотами двигателя (y_3).
t_{10}	Ускорение/торможение	Постоянное торможение/ускорение повышает износ шин (x_5) на 15%.
t_{11}	Соблюдение правил экологичного вождения	Эко-режим снижает нагрузку на ДВС, приводит к снижению (y_1-y_7) и уменьшает дымность.

Низкая квалификация водителя коррелирует с неоптимальным управлением параметрами $t_1 - t_{11}$. Обучение экологичному вождению (*Eco-Driving*) снижает выбросы CO₂ на 12–18% [187]. Например, соблюдение режима t_{11} (экологичное вождение) позволяет минимизировать резкие ускорения (t_2), что снижает y_1 - длительность впрыска и снижает дымность отработавших газов на 3-10%.

Подсистема E_3 - условия движения в улично-дорожной среде, сформированные внешними факторами, влияющими на ЭБТС. Подсистема представлена функцией $E_3 = (z_1, z_2, \dots, z_n)$. Наиболее значимые параметры этой представлены в таблице 2.2. Подсистемы E_3 и E_2 взаимодействуют между собой. Например, параметры z_1 (качество покрытия) и z_6 (уклон) усиливают износ шин (x_5) и турбокомпрессора (x_3). Погодные условия (z_3) снижают эффективность

каталитических нейтрализаторов, что отражается в y_6 (температура впускного воздуха). Например, в морозную погоду ($z_3 < 0^\circ\text{C}$) температура впускного воздуха (y_6) падает ниже 40°C , что ухудшает сгорание топлива и повышает дымность на 15%. Аналогичным образом взаимодействуют E_1 с E_2 и E_1 с E_3 .

Таблица 2.2 – Основные параметры группы параметров Z

№	Значение параметра	Описание и влияние
z_1	Качество покрытия	Неровности дороги увеличивают сопротивление качению на 10–15%.
z_2	Интенсивность трафика	Заторы повышают время холостого хода, увеличивая выбросы CO на 25% [190].
z_3	Погодные условия	Обледенение приводит к увеличению нагрузки на ДВС, повышая расход топлива на 10%.
z_4	Ширина полосы	Сужение дороги усиливает t_2 (резкие манёвры).
z_5	Уклон дороги	Крутые подъёмы ($>10\%$) увеличивают нагрузку на ДВС.
z_6	Плотность населения	В урбанизированных зонах пробки (z_2) возникают чаще.
z_7	Уровень шума	Высокий уровень шума (>80 дБ) увеличивает t_7 (усталость водителя).
z_8	Состояние освещения	Недостаточное освещение дороги повышает частоту торможений (t_2).
z_9	Наличие полос разгона/торможения	Оптимизирует t_3 (стиль вождения) и снижает износ шин (x_5).

Подсистема E_2 - Автомобиль – представляет собой совокупность параметров, характеризующих техническое состояние дизельного двигателя. Можно отметить, что эти параметры представляют собой структурные параметры и, как правило, требуют сравнительно больших временных затрат и специального,

как правило, дорогостоящего, оборудования для их измерений. В некоторых случаях требуют частичной или полной разборки агрегата для их измерения. К этой группе можно отнести группу параметров $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Основные параметры этой группы для дизельных двигателей экологического класса Евро-4 и ниже представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Основные параметры группы параметров X

№	Значение параметра	Описание и влияние
x_1	Износ форсунок	Снижает точность дозирования
x_2	Компрессия двигателя	Снижение компрессии повышает дымность ОГ.
x_3	Состояние турбины	Износ турбины снижает КПД дизельного ДВС на 5–8% [192].
x_4	Эффективность EGR	Недостаточная рециркуляция ОГ повышает NOx на 20–30%.
x_5	Износ шин	Удельная эмиссия микрочастиц резины составляет до 50% от общего загрязнения атмосферы твёрдыми частицами [191].
x_6	Состояние сажевого фильтра (DPF)	В автомобилях с дизельными двигателями экологического класса Евро-3 отсутствует, что увеличивает выбросы PM. Состояние DPF при его наличии определяет количество выбросов и влияет на давление ОГ в системе выпуска.
x_7	Температура охлаждающей жидкости	Снижение ниже 80°C ухудшает сгорание.
x_8	Давление в <i>common rail</i>	Снижение давления ухудшает распыление топлива.
x_9	Состояние топливного фильтра	Засорение фильтра влияет на давление в рампе (γ_2).

Таблица 2.3 – Продолжение

x_{10}	Износ поршневой группы	Снижает герметичность цилиндров, увеличивая количество продуктов неполного сгорания топлива.
x_{11}	Состояние выпускной системы	Засорение элементов выпускного коллектора увеличивает обратную тягу, повышая нагрузку на двигатель.

В виду сказанного выше рационально переходить к оценке значения X косвенным способом с использованием диагностических параметров, используемых электронным блоком управления. Параметры, используемые электронным блоком управления, представленные группой параметров $\gamma = (\gamma_1 \dots \gamma_n)$, формируются после преобразования сигналов, полученных электронным блоком управления от датчиков системы управления двигателем. Эти параметры определяют характер управляющих воздействий, формируемых электронным блоком управления, что определяет режим работы. Управляющие воздействия определяются управляющими сигналами, которые представлены группой параметров $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$. Основные параметры групп γ и D для дизельных двигателей экологического класса Евро-4 и ниже представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Основные параметры групп параметров γ и D

№	Значение параметра	Описание и влияние
y_1	Давление в common rail	Определяет качество распыления.
y_2	Частота вращения коленчатого вала двигателя	Влияет на газодинамику и полноту сгорания топлива.
y_3	Давление во впускном коллекторе	Определяет количество топлива (d_1) и регулирование наддува (d_3).
y_4	Температура впускного воздуха	Определяет температуру рабочей смеси и эффективность сгорания.

Таблица 2.4 – Продолжение

y_5	Содержание кислорода в ОГ	Показания датчика кислорода влияют на корректность работы системы рециркуляции ОГ и на правильность смесеобразования.
y_6	Положение педали акселератора	Определяет d_1 и d_3 которые формируют значения y_2 и y_3 .
d_1	Время впрыска	Зависит от производительности форсунок, состояния сопловых отверстий, давления в рампе и др.
d_2	Пропорциональность EGR	20–25% для Евро-4.
d_3	Режим работы турбины	Определяет d_1 .
d_4	Регулятор давления ТНВД	Определяет y_1 .

Таким образом подсистемы E_1 , E_2 и E_3 можно представить в виде функций E_1 , E_2 и E_3 :

$$E_1 = f(t_1, t_2, \dots, t_n), \quad (2.1)$$

$$E_2 = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(y_1, y_2, \dots, y_n; d_1, d_2, \dots, d_n), \quad (2.2)$$

$$E_3 = f(z_1, z_2, \dots, z_n), \quad (2.3)$$

С учётом результатов декомпозиции можно представить уровень экологической безопасности E как функцию:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = f(t_1, t_2, \dots, t_n; y_1, y_2, \dots, y_n; d_1, d_2, \dots, d_n; z_1, z_2, \dots, z_n), \quad (2.4)$$

Проведённое исследование позволяет утверждать, что группа параметров E_2 (автомобиль) является доминирующим фактором в обеспечении экологической безопасности транспортных средств эксплуатационными методами, так как его параметры напрямую контролируются в процессе технической эксплуатации. Системный анализ позволил выявить, что параметры

$E2$ (например, износ форсунок) напрямую определяют уровень выбросов РМ-частиц и NO_x . Ветви $E1$ и $E3$ оказывают косвенное влияние, усиливая негативные эффекты параметров $E2$. Например, высокая интенсивность трафика (z_2) приводит к увеличению времени холостого хода, что ухудшает эффективность работы ЭБУ (d_2 —пропорциональность EGR) и повышает выбросы CO .

Тогда целевую функцию, оценивающую дымность отработавших газов можно представить как:

$$k = f(y_1, y_2, \dots, y_n; d_1, d_2, \dots, d_n), \quad (2.5)$$

Таким образом подтверждается гипотеза, что подсистема $E2$ (автомобиль) является ключевым фактором ЭБТС. Параметры механических компонентов (x_1, x_2, \dots, x_n) и ЭБУ ($y_1, y_2, \dots, y_n; d_1, d_2, \dots, d_n$) напрямую контролируются в процессе эксплуатации, что позволяет эффективно влиять на уровень выбросов. Ветви $E1$ (водитель) и $E3$ (дорога) усиливают негативное воздействие, но их влияние вторично. Для теоретического подтверждения результатов декомпозиции и точного определения вида математических зависимостей необходима разработка комплекса математических моделей, описывающих влияние параметров, используемых электронным блоком управления ($y_1, y_2, \dots, y_n; d_1, d_2, \dots, d_n$) на дымность отработавших газов.

Тогда комплекс математических моделей описывающих взаимосвязь значений параметров, используемых блоком управления двигателем, с дымностью отработавших газов можно представить в виде схемы, представленной на рисунке 2.2.

В данном комплексе 1 – модели, обуславливающие взаимосвязь между конструктивными параметрами, характеризующими износ форсунки и параметрами, используемыми электронным блоком управления, 2 – модели, обуславливающие взаимосвязь между параметрами, характеризующими износ форсунки и параметрами, характеризующими подачу топлива и качество его распыления, 3 – модели, обуславливающие взаимосвязь конструктивных параметров с дымностью отработавших газов, 4 – модели, обуславливающие

взаимосвязь параметров, используемых электронным блоком управления, и дымностью отработавших газов.

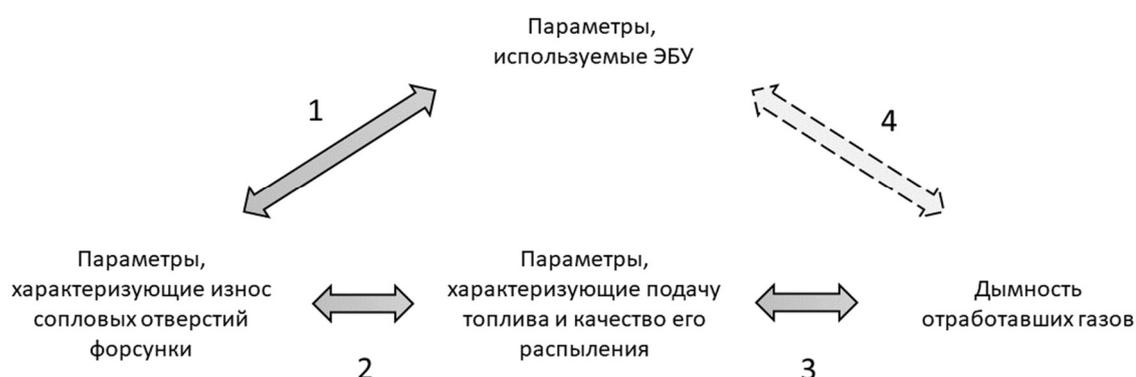


Рисунок 2.2 – Схема комплекса математических моделей описывающих взаимосвязь значений параметров, используемых блоком управления двигателем, с дымностью отработавших газов.

Комплекс предполагает переход от 1, 2 и 3 типа моделей к разработке моделей 4 типа. Именно они позволят реализовать метод повышения экологической безопасности АТС, предупреждающий нарушение требований к дымности отработавших газов при эксплуатации автомобильного транспорта с дизельными двигателями, основанный на непрерывном контроле параметров, используемых электронным блоком управления двигателем.

2.2 Анализ моделей процесса образования частиц сажи в цилиндрах дизельного двигателя

Как свидетельствуют результаты анализа литературных источников [75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84], процесс сажеобразования в цилиндрах дизеля, как и факторы, влияющие на него, описываются в соответствии с несколькими основными моделями. «Формирование первичных очагов пламени в ходе подачи топлива, в соответствии с имеющимися источниками [75, 76], осуществляется на поверхности каждого потока, в нескольких точках близкой к отверстию сопла части. Пламя распространяется по наружной поверхности потоков, охватывая всю поверхность целиком в течение примерно 0,6 мс и прогревая таким образом топливно-воздушную смесь.

Иными словами, именно на поверхности потоков топлива осуществляется процесс теплообмена, тогда как при нехватке воздуха во внутренней части потоков образуется сажа.

Для анализа качества распыливания топлива можно применить, например, [76]:

$$K_{p\Sigma} = F_{\phi\Sigma}/Q_{\text{ц}}, \quad (2.6)$$

где $F_{\phi\Sigma}$ – суммарная площадь поверхности топливных струй в конце процесса топливоподачи, $Q_{\text{ц}}$ – цикловая подача топлива» (Глазков, Д. Ю., 2018, С. 131).

Описание моделей, принятых за рубежом, приводится в [77, 78, 79, 80, 81]. «Среди описанных моделей можно выделить:

- феноменологическую 0-мерную модель, суть которой заключается в том, что полный объём цилиндра можно разделить на зоны сгорания и отсутствия сгорания. В зоне отсутствия сгорания будет находиться сухой воздух с парами топлива (н-гептан). Расчёт массообмена в этих зонах выполняется в соответствии

с объёмом подаваемого топлива, а также с уравнениями массообмена через клапаны и межзоновой массопередачи [143];

- модель впрыска, разработанную Сиберсом. В этой модели установлена взаимосвязь между геометрическими параметрами струи топлива и формой факела распыла [77]; модель основана на концепции развития струи идеальной неиспаряющейся жидкости и описывает процесс массопередачу между потоком топлива и окружающим газом в следующем уравнении:

$$m'_{as} = \rho(V'_s - \frac{(V_{cyl} - V_s)m'_{cyl}}{V_{cyl}} - V_s V'_{cyl} / V_{cyl} \quad (2.7)$$

где V_{cyl} и V_s обозначают объёмы камеры сгорания и потока топлива, V'_s и V'_{cyl} обозначают скорости динамики параметров потока и объёма цилиндра» (Глазков, Д. Ю., 2018, С. 131). Вместе с тем, определение скорости изменения объёма потока топлива, в соответствии с [81], может вызывать затруднения, что осложняет применение модели.

- Модель двухстадийной турбулентности (К-К-модель), предложенная Chemla и Orthaber [78], представляет собой подход, акцентирующий внимание на ключевой роли вихреобразования в цилиндре и кинетической энергии топлива в процессе сгорания. Согласно данной концепции, вихревые потоки, формирующиеся при продувке камеры сгорания после запуска впрыска, оказывают существенное влияние на структуру топливной струи, деформируя её.

На начальном этапе кинетическая энергия, связанная с подачей топлива, генерирует крупномасштабную турбулентность внутри объёма струи. Затем эта энергия трансформируется, передаваясь в более мелкие масштабы, где постепенно рассеивается благодаря вязкостному трению. Такой механизм подчёркивает важность взаимодействия между турбулентностью и процессами смешения топлива с окислителем, что существенно влияет на эффективность и динамику сгорания.

«Таким образом, модель демонстрирует, как многоуровневая природа турбулентности определяет основные этапы горения, делая её полезным инструментом для анализа и оптимизации рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания.

$$\frac{dK_{cyl}}{dt} = C_{int} \left(\frac{m'_{int} v_{int}^2}{2} \right) + C_{exh} \left(\frac{m'_{exh} v_{exh}^2}{2} \right) + \frac{dK_{swirl}}{dt} - \left(\frac{dK_{cyl}}{dt} \right) diss + K_{cyl} \frac{m_{exh}}{m}, \quad (2.8)$$

где K – кинетическая энергия; C – опытные коэффициенты; индекс “*diss*” значит «Рассеивание». В этом уравнении учитываются такие факторы, как скорость воздуха на входе в цилиндр, скорость ОГ на выходе из него, кинетическая энергия вихревого движения, численное определение которых существенно усложняет расчёты» (Глазков Д.И., 2015, С 240).

- Модель Хироясу [79] «заключается в том, что содержание сажи определяется как разность между количеством образовавшейся и выгоревшей сажи

$$\frac{dM_s}{dt} = \frac{dM_{sf}}{dt} - dM_{so}/dt, \quad (2.9)$$

где $\frac{dM_{sf}}{dt}$ отвечает за образование сажи, а dM_{so}/dt – за её выгорание» (Глазков Д.И., 2015, С 240). «Количество образовавшейся сажи определяется по уравнению Аррениуса:

$$\frac{dM_{sf}}{dt} = A_{sf} M_{sp} P^n \exp \left(-\frac{E_{sf}}{RT} \right), \quad (2.10)$$

В данном уравнении A_{sf} и n – эмпирические показатели; M_{sp} – масса топлива в цилиндре; P и T – давление и температура в цилиндре; R – универсальная газовая постоянная.

Окисление сажи определяется следующим образом:

$$\frac{dM_{so}}{dt} = 6MW_c M_s R_{tot} / (\rho_s D_s) \quad (2.11)$$

где M – масса воздуха в цилиндре; W_c – скорость поршня; D_s – диаметр топливной струи; ρ_s – её плотность» (Глазков Д.И., 2015, С 240).

В источниках [80, 143] приводится следующая информация про Модель Мосса: «отражает упрощённое представление процессов нуклеации, коагуляции и окисления сажи, связывая объём фракции f_v и её относительную плотность n . Уравнение данного метода выглядит следующим образом:

$$\frac{d(\rho_s f_s)}{dt} = \gamma n + \delta - \left(\frac{36}{\rho_s}\right)^{\frac{1}{3}} n^{\frac{1}{3}} (\rho_s f_v)^{2/3} R_{tot} \quad (2.12)$$

В данном уравнении γ и δ – коэффициенты роста поверхности и нуклеации, соответственно. Данная модель не учитывает эксплуатационных или конструктивных характеристик в явном виде» (Глазков Д.И., 2015, С 240).

Далее рассматриваются модели, описываемые в работах исследователей советского периода [76,82,83,84].

Методика проф. В.И. Одинцова [76] создана на основе сопоставления проектируемого (анализируемого) ДВС с определённым образцом (эталонном) с заданными характеристиками конструкции и параметрами рабочего процесса. Основные положения метода представлены на рисунке 2.1.

В рамках методики предлагается вычислить показатели В-Е для проектируемого двигателя. После чего провести расчёты с помощью экспоненциальной функции, описывающей закон сгорания:

$$x = 1 - \exp(-BCDE^{0,2} \left(\frac{\tau}{\tau_z}\right)^{m+1}) \quad (2.13)$$

$$B = \left(\frac{\mu_{cn}}{\mu_s}\right)^{1.42} * \left(\frac{d_{cn}}{d_{cs}}\right)^{1.05} * \left(\frac{P_{fn} - P_{fm}}{P_{fs} - P_{fz}}\right)^{0.71} * \left(\frac{\rho_{Tn}}{\rho_{Ts}}\right)^{1.05}$$

$$* \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_n}\right)^{0.37} * \left(\frac{\mu_n}{\mu_s}\right)^{0.32} * \frac{P_{sn}}{T_{sp}} * \frac{T_{sp}}{J_{cs}} * \frac{J_{cs}}{g_{un}} * \frac{g_{un}}{g_{us}}, \quad (2.14)$$

$$C = \frac{\tan(\gamma_s) \cdot (1/\cos(\gamma_s) + \tan(\gamma_s))}{\tan(\gamma_r) \cdot (1/\cos(\gamma_r) + \tan(\gamma_r))}, \quad (2.15)$$

$$D = \frac{\tau_{упр.н}}{\tau_{мод.н}} \cdot \frac{\tau_{упр.р}}{\tau_{мод.р}} \cdot \left(\frac{\tau_{zn} - 0.5 \cdot \tau_{ср.н}}{\tau_{zs} - 0.5 \cdot \tau_{ср.р}}\right)^{1.6}, \quad (2.16)$$

$$E = 6.908 \cdot \alpha_{tr} \cdot \left(\frac{P_{cn} + P_{maxn}}{P_{cs} + P_{maxs}}\right)^{0.5}, \quad (2.17)$$

На основании этой методики Д.Ю. Глазковым было предложено выражение для расчёта эмиссии сажи с ОГ:

$$\frac{C_n}{C_s} = H \left(\frac{J_{cэ}}{J_{cn}}\right)^{0.4} \left(\frac{d_{cэ}}{d_{cn}}\right)^{0.8} \left(\frac{g_{cэ}}{g_{cn}}\right)^{-0.4} \left(\frac{P_{mэ}}{P_{mn}}\right)^{0.3} \left(\frac{C_s}{C_n}\right)^{0.08} \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_n}\right)^{-0.08} \left(\frac{Q_{нэ}}{Q_{нп}}\right)^{-0.1} \quad (2.18)$$

где – критерий; J_c и d_c – число и диаметр сопловых отверстий распылителя; $g_{ц}$ – цикловая подача топлива; p_T – среднее давление топлива в процессе впрыска; α – коэффициент избытка воздуха при сгорании; C – геометрическая характеристика топливной струи [85,86]; $Q_{нэ}$ и $Q_{нп}$ – теплотворные способности топлив.

Модель, разработанная проф. Разлейцевым, в которой учитывается влияние особенностей процесса горения распылённого топлива на появление и сгорание сажевых частиц.

Модель изменения концентрации сажи в цилиндре можно представить в виде уравнения:

$$\frac{d[C]}{dt} = \left(\frac{d[C]}{dt}\right)_K + \left(\frac{d[C]}{dt}\right)_П - \left(\frac{d[C]}{dt}\right)_B - \left(\frac{d[C]}{dt}\right)_V, \quad (2.19)$$

где слагаемые описывают процессы формирования сажи в пламени, полимеризацию, выгорание сажи, изменение концентрации сажи в цилиндре за счёт изменения текущего объёма цилиндра.

Скорость саже образования на различных этапах принимается в виде:

$$\left(\frac{d[C]}{dt}\right)_K = \frac{B1Q_{ц}}{V} \left(\frac{dx}{dt}\right); \quad (2.20)$$

$$\left(\frac{d[C]}{dt}\right)_{\Pi} = B2\delta Q_{ц}/V \left(\frac{dS}{dt}\right); \quad (2.21)$$

$$\left(\frac{d[C]}{dt}\right)_B = B3n^{0,5}p[C] \quad ; \quad (2.22)$$

$$\left(\frac{d[C]}{dt}\right)_V = B4[C]6n\left(\frac{dV}{V}\right); \quad (2.23)$$

«где $B1-B4$ – эмпирические коэффициенты; $Q_{ц}$ и V – цикловая подача топлива и объём цилиндра соответственно; (dx/dt) – скорость тепловыделения; δ – доля массы капли, превращающаяся в сажевое ядро; S – доля капель с диаметром меньше d_k (согласно закону Срезневского, в [85,86]); n – обороты коленчатого вала; p – давление в цилиндре; $[C]$ – текущая концентрация сажи в цилиндре» (Глазков Д.И., 2015, С 240).

В сущности, данная модель демонстрирует значительное сходство с моделью Хироясу, описанной в работе [79], и интегрирует широкий спектр эксплуатационных и конструктивных параметров. В исследовании [84] представлены уточнённые значения $\left(\frac{d[C]}{dt}\right)_{\Pi}$ для фазы подачи топлива и после её завершения, которые определяются с использованием уравнений, приведённых в [143]:

$$\left(\frac{d[C]}{dt}\right)_{\Pi} = 1,7 \frac{Q_{ц}}{V} \frac{1 - \exp(-(\sqrt{K\tau}/d_z)^{n'})}{\tau_{впр}}, \quad (2.24)$$

$$\left(\frac{d[C]}{dt}\right)_{\Pi} = 0,0028(1 - \chi_{впр}) \frac{n'Q_{ц}}{2V\tau_2} \left(\sqrt{K\tau} \frac{1}{d_{32}}\right)^{n'} \exp\left(-\sqrt{\frac{K\tau}{d_z}}\right)^{n'}, \quad (2.25)$$

где τ - текущее время от начала впрыскивания топлива; $\tau_{впр}$ - продолжительность впрыскивания топлива; n' - характеристика распределения (для дизельных форсунок $n' = 2...4$); K - константа испарения; d_{32} - средний диаметр капель по Заутеру; τ_2 - текущее время от конца подачи топлива; $\chi_{впр}$ - доля теплоты, выделившаяся к концу топливоподачи.

Анализ представленных моделей позволяет заключить, что большинство подходов к математическому описанию механизмов образования сажевых частиц характеризуются высокой сложностью вычислений и предполагают использование обширного массива исходных данных. Такие методы требуют значительных временных и вычислительных ресурсов для корректного моделирования процессов, что делает их применение менее доступным без использования специализированного программного обеспечения и мощных вычислительных систем.

Кроме того, необходимость в большом объёме входных параметров усложняет процесс подготовки данных, увеличивая вероятность погрешностей на этапе их сбора и обработки. Это подчеркивает важность разработки более упрощённых или оптимизированных подходов, которые позволили бы сохранить точность расчётов при снижении их трудоёмкости. [143].

Модели Хироясу, Одинцова и Разлейцева учитывают основные конструктивные характеристики двигателей и топливной аппаратуры. Согласно этим моделям на процесс сажеобразования в цилиндре влияют несколько

основных параметров: цикловая подача, характеристики подачи топлива, в т.ч. средний диаметр капель по Заутеру, скорость тепловыделения и др.

2.3 Комплекс математических моделей в методе повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями, основанном на непрерывном контроле параметров, используемых электронным блоком управления

2.3.1 Обоснование зависимости параметров подачи топлива от характеристик распылителя форсунки

Закономерности, описывающие впрыск топлива из традиционных форсунок справедливы и для электрогидравлических форсунок системы common rail. Тогда закономерность истечения топлива из открытой форсунки можно отобразить при помощи уравнения [74, 186]:

$$p_{\text{рамп}} - p_{\text{цил}} = \frac{Q_{\text{ф}}^2 \cdot \rho_{\text{т}}}{2 * (\mu_{\text{с}} * f_{\text{с}})^2}, \quad (2.26)$$

где $p_{\text{рамп}}$ – давление топлива в топливной рампе, (Н/м²); $p_{\text{цил}}$ – давление в цилиндре, (Н/м²); $Q_{\text{ф}}$ – объёмный расход топлива, (м³/с); $\rho_{\text{т}}$ – плотность дизельного топлива; $\mu_{\text{с}}$ – коэффициент расхода через сечения отверстий распылителей форсунки, $f_{\text{с}}$ – площадь поперечных сечений отверстий распылителей форсунки, (м²) [186].

Преобразованием (2.5) можно получить уравнение зависимости объёмного расхода q_{12} топлива через отверстия распылителей форсунки [186]:

$$Q_{\text{ф}} = \mu_{\text{с}} * f_{\text{с}} \sqrt{2 * \frac{|(p_{\text{рамп}} - p_{\text{цил}})|}{\rho_{\text{т}}}} = \mu_{\text{с}} * f_{\text{с}} * v_{\text{т}}, \quad (2.27)$$

где $v_{\text{т}}$ – теоретическая скорость истечения топлива [143].

Тогда, согласно уравнению 2.27, количество поданного топлива связано с износом форсунки через произведение площади сопловых отверстий на коэффициент расхода топлива через сопло – эффективным проходным сечением $[\mu_c * f_c]$. Коэффициент расхода топлива через сопло μ_c как правило принимает значения в диапазоне от 0,6 до 0,8 и представляет соотношение действительного и теоретического расхода топлива. Однако на практике чаще всего определяется эмпирическим путём и в общем виде выражается в виде зависимости, которая представлена ниже: [27]:

$$\mu_i = a_{i0} + a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + a_{i4}x_4 + a_{i5}x_5 + a_{i6}x_6, \quad (2.28)$$

где a_{i1}, \dots, a_{i6} – регрессионные коэффициенты, x_1 – площадь сопла, x_2 – диаметр сопла, x_3 – перепад давления между корпусом форсунки и цилиндром, x_4 – отношение динамической вязкости к плотности топлива, x_5 – температура топлива, x_6 – параметр, характеризующий значение числа Рейнольдса.

2.3.2 Обоснование зависимости параметров, характеризующих качество распыления топлива, от характеристик распылителя форсунки

Исследования в области распыливания топлива в цилиндрах дизельных двигателей приводятся в [85, 86, 87, 88, 89, 90]. «Одной из основных характеристик, применяемых в расчётах, является средний диаметр капель по Заутеру, который пропорционален отношению суммарного объёма всех капель к их суммарной поверхности [87,143].

$$d_z = \frac{\sum N_i * d_i^3}{\sum N_i * d_i^2}, \quad (2.29)$$

где d_i – наружный диаметр каплей определённого размера; N_i – кол-во каплей с таким диаметром» (Макушев Юрий Петрович, Полякова Татьяна Анатольевна, Михайлова Лариса Юрьевна, Филатов Алексей Владимирович, 2017, 185)

«Средний диаметр каплей по Заутеру рассчитывается исходя из условия равенства поверхностей и объёмов (масс) каплей реального факела распыла и гипотетических каплей среднего размера. Этот параметр играет ключевую роль в оценке общей поверхности распыления. Качество распыления, характеризуемое средним диаметром Заутера, отражает диаметр каплей однородного тумана, который для заданного объёма жидкости создаёт такую же площадь поверхности испарения, как и реальный туман. Анализ научных работ [85, 86, 87, 88, 89, 90] позволяет выделить основные факторы, существенно влияющие на качество распыления топлива. К ним относятся снижение вязкости и коэффициента поверхностного натяжения топлива, увеличение перепада давления в сопловом отверстии, изменение давления среды, размер сопла. Физическими причинами разделения струи топлива на отдельные капли являются такие явления, как капиллярное натяжение, колебательные процессы внутри струи и скорость истечения топлива.

Распыливание топлива зависит от числа Вебера и Рейнольдса [91]:

$$We = \frac{\Delta P * d_c}{\sigma}; \quad (2.30)$$

$$Re = \frac{\vartheta * d_c}{\nu}, \quad (2.31)$$

где ΔP – перепад давления (Н/м^2) в сопловом отверстии и среды, куда производится впрыск;

d_c – диаметр соплового отверстия, м;

σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости,

Н/м ; ϑ средняя скорость движения жидкости (м/с);

ν – кинематическая вязкость жидкости ($\text{м}^2/\text{с}$).

Безразмерный критерий Лапласа также связывает между собой параметры, влияющие на качество распыления:

$$L_p = \frac{\rho_T * d_c * \sigma}{\mu_T}, \quad (2.32)$$

где d_c – диаметр соплового отверстия, м;

σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м;

μ_T – коэффициент динамической вязкости топлива, Н·с/м²;

ρ_T – плотность топлива» (Макушев Юрий Петрович, Полякова Татьяна Анатольевна, Михайлова Лариса Юрьевна, Филатов Алексей Владимирович, 2017, 185)

Поскольку измерение размера капель в камере сгорания представляет собой затратный и трудоёмкий процесс, то рационально будет применять эмпирическую формулу [86], в соответствии с которой средний диаметр капель можно представить в виде:

$$d_z = d_c * b_1 * \left(\frac{\rho_B}{\rho_T} * We\right)^{b_2} * L_p^{b_3} \quad (2.31)$$

Где d_c – диаметр сопла, $b_1...b_3$ – эмпирические коэффициенты, We и L_p – числа Веббера и Лапласа.

Согласно выражению 7 качество распыления топлива в цилиндре зависит от диаметра сопловых отверстий. То есть по мере износа форсунок размер капель будет увеличиваться, а значит, будет снижаться полнота сгорания топлива.

2.3.3 Обоснование введения диагностического параметра – длительности впрыска топлива – зависящего от износа сопловых отверстий топливной форсунки

Согласно уравнению 2.27, блок управления двигателем, для контроля Q_{ϕ} , может влиять только на $\tau_{\text{впр}}$. Следовательно, длительность впрыска $\tau_{\text{впр}}$, является параметром, значение которого электронный блок управления двигателем изменяет в ответ на изменение $\mu_c * f_c, p_{\text{рамп}}, p_{\text{цил}}$. Исправность прочих элементов ТА подразумевает нахождение значений давления топлива в рампе в определённом диапазоне, состояние цилиндропоршневой группы (ЦПГ) можно охарактеризовать массовым расходом воздуха или давлением во впускном коллекторе (данные можно получать из бортовой системы самодиагностики [132]), тогда можно рассматривать цикловую подачу как:

$$Q_{\text{ц}} = f(\tau_{\text{впр}}), \quad (2.32)$$

Тогда длительность впрыска для форсунок с учётом параметров, характеризующих качество распыливания и размер капель, можно описать с помощью следующего выражения (справедливого как для механических, так и для электрогидравлических топливных форсунок системы Common Rail):

$$\tau_{\text{впр}} = ((a_{i0} + a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + a_{i4}x_4 + a_{i5}x_5 + a_{i6}x_6) * \frac{n * 4}{\pi} * \left(\frac{dz}{b_1 * (\frac{\rho_{\text{в}} * W_e}{\rho_{\text{т}}})^{b_2} * L_p^{b_3}} \right)^2 \sqrt{2 * \frac{|(p_{\text{рамп}} - p_{\text{цил}})|}{\rho_{\text{т}}}}) / Q_{\text{ц}}, \quad (2.33)$$

Таким образом обоснован диагностический параметр, зависящий от износа сопловых отверстий распылителя форсунки.

2.3.4 Обоснование зависимости дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от длительности впрыска топлива

Изучение множества способов моделирования процесса сажеобразования и расчёта количества сажи в отработавших газах дизельного двигателя показало, что основными факторами, влияющими на количество сажи, являются масса или объем фактически попавшего в цилиндр топлива (зависит от величины цикловой подачи), средний диаметр капель, скорость потока воздуха и его количество, и др. Однако большинство этих параметров являются конструктивными, не изменяются в процессе эксплуатации транспортного средства или косвенно учтены в уравнении 2.33. Также установлено, что следствием износа форсунки является увеличение количества топлива, фактически попавшего в цилиндр при том же времени открытия форсунки. При этом при уменьшении диаметра соплового отверстия количество поступившего фактически топлива будет снижаться (при закоксовывании сопла). Таким образом, с учётом выражения (2.33) можно описать концентрацию сажи как функцию:

$$k = f\left(\tau_{\text{впр}}, p_{\text{абс}}, p_{\text{рампп}}, N_{\text{обор}}, EGR_{\text{rate}}, \frac{dN}{dt}, T_{\text{вп}}\right), \quad (2.34)$$

Которая в свою очередь может быть представлена в виде регрессионной модели:

$$PM = k_0 \cdot t_{\text{впр}}^{a_1} \cdot N_{\text{обор}}^{a_2} \cdot p_{\text{абс}}^{a_3} \cdot p_{\text{рампп}}^{a_4} \cdot EGR_{\text{rate}}^{a_5} \cdot e^{a_6 \cdot T_{\text{вп}}} \cdot \left(1 - \frac{dN}{dt}\right)^{a_7} + b_0, \quad (2.35)$$

Где $p_{\text{абс}}$ – значение абсолютного давления во впускном коллекторе (Н/м²), $N_{\text{обор}}$ – частота вращения коленчатого вала (об/мин), EGR_{rate} – пропорциональность открытия клапана рециркуляции отработавших газов, $\frac{dN}{dt}$ – скорость изменения оборотов, $T_{\text{вп}}$ – температура впускного воздуха, $k_0, b_0, a_1 \dots a_3$ – регрессионные коэффициенты.

Согласно некоторым исследованиям [169,75] возможно рассчитывать количество вредных выбросов с ОГ с помощью небольшого количества

диагностических параметров и введением эмпирических коэффициентов, получаемых после проведения эксперимента.

Следует учесть, что измерение дымности проводится в режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя, в котором некоторые параметры можно принять как константы. Также необходимо преобразовать концентрацию сажи в дымность, для чего необходимо ввести базовый коэффициент пересчёта, тогда:

$$k = k_{\Pi} \cdot (k_0 \cdot t_{\text{впр}}^{a_1} + b_0), \quad (2.36)$$

Где k – дымность отработавших газов, (м^{-1}), k_{Π} – базовый коэффициент пересчёта дымности, ($\text{м}^{-1}/(\text{мг}/\text{м}^3)$).

Значения эмпирических коэффициентов для исследуемого двигателя можно получить, применив метод регрессионного анализа [143]. Суть регрессионного анализа сводится к установлению уравнения регрессии, т.е. вида кривой, характеризующей связь между величинами (аргументом $t_{\text{впр}}$ и функцией k), оценке тесноты связей между ними, достоверности и адекватности результатов измерений.

Различают однофакторные (парные) и многофакторные регрессионные зависимости.

1) Парная регрессия при парной зависимости может быть аппроксимирована прямой линией, параболой, гиперболой, логарифмической, степенной или показательной функцией, полиномом и др.

2) Двухфакторное поле можно аппроксимировать плоскостью, параболоидом второго порядка, гиперболоидом.

Критерием близости корреляционной зависимости между X и Y к линейной функциональной зависимости является коэффициент парной или просто коэффициент корреляции r , показывающий степень тесноты связи X и Y .

- при $r = 1,0$ X и Y связаны функциональной связью (в данном случае линейной), т.е. каждому значению X соответствует только одно значение Y ;
- если $r < 1,0$, то линейной связи не существует;
- при $r = 0$ линейная корреляционная связь между X и Y отсутствует, но может существовать нелинейная регрессия.

Обычно считают тесноту связи удовлетворительной при $r > 0,5$; хорошей при $r = 0,8 \dots 0,85$. Для определения процента разброса (изменчивости) искомой функции Y относительно её среднего значения, определяемого изменчивостью фактора X , вычисляют коэффициент детерминации [92]. Результаты регрессионного приведены в главе 3.

Выводы по второй главе

1. Разработана концепция метода повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями. Концепция базируется на следующей гипотезе: Выявление нарушения требований к ОГ непосредственно в процессе работы автомобильного дизельного двигателя возможно косвенным способом за счёт анализа параметров, используемых электронным блоком управления двигателем, а именно путём анализа изменения времени открытия форсунки (длительность впрыска, цикловая подача) как диагностического параметра, связанного с износом или коксованием сопловых отверстий форсунки и износом посадочного места и иглы.

2. Произведено исследование методов и моделей процесса образования частиц сажи в цилиндрах дизельного двигателя и установлено, что для реализации концепции требуется произвести математическое моделирование зависимости количества вредных выбросов с ОГ с помощью ограниченного количества диагностических параметров. При этом одним из важнейших параметров является цикловая подача $Q_{ц}$ и длительность впрыска $\tau_{впр}$.

3. Обоснована зависимость параметров подачи топлива от характеристик распылителя. Основной характеристикой распылителя является его эффективное проходное сечение $[\mu_c * f_c]$, где коэффициент расхода μ_c может быть представлен в виде зависимости $\mu_i = a_{i0} + a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + a_{i4}x_4 + a_{i5}x_5 + a_{i6}x_6$

4. Научно обосновано введение диагностического параметра – длительности впрыска топлива – зависящего от износа сопловых отверстий распылителя форсунки и позволяющего осуществлять контроль дымности отработавших газов

5. Установлена зависимость дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от параметров, используемых электронным блоком управления, которая может быть представлена как функция $k = f\left(\tau_{\text{впр}}, p_{\text{абс}}, p_{\text{рамп}}, N_{\text{обор}}, EGR_{\text{rate}}, \frac{dN}{dt}, T_{\text{вп}}\right)$. В режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя эта зависимость принимает вид $k = k_{\Pi} \cdot (k_0 \cdot t_{\text{впр}}^{a_1} + b_0)$.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАВИСИМОСТИ ДЫМНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ОТ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ БЛОКОМ УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

3.1 Программа, методы, цели и задачи проведения экспериментальных исследований

На рисунке 3.1. представлена схема планирования эксперимента и ожидаемых результатов, составленная по результатам проведённых аналитических и теоретических исследований для решения поставленных задач.



Рисунок 3.1 – Планирование эксперимента

В ходе проведения экспериментального исследования были выполнены следующие его этапы:

- 1) Проведён анализ процесса впрыскивания и распыливания топлива форсунками системы Common Rail на базе CFD-модели.
- 2) Проведена микроскопия сопловых отверстий форсунок двигателя Isuzu 4Н11.
- 3) Собраны экспериментальные данные для уточнения математической модели зависимости дымности отработавших газов от длительности впрыска топлива.
- 4) На основе полученных экспериментальных данных разработана регрессионная модель, описывающая зависимость дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от длительности впрыска топлива

Порядок проведения опытного исследования топливной аппаратуры «Common Rail», как и его организационные особенности, обусловлены целями и задачами настоящего исследования в целом, которые были подробно представлены ранее. В ходе эксперимента предполагается целевое изучение реакции рассматриваемого процесса или системы на искусственно спровоцированные изменения, как предусмотренные, так и не предусмотренные прогнозами. Константы и закономерности рассматриваемой системы определяются в соответствии с особенностями реакций, наблюдаемых в ходе эксперимента [27].

В ходе решения поставленных задач эксперимента применялись лабораторные, натурные и модельные исследовательские методы.

При проведении натурального исследования его условия соответствуют реальным условиям эксплуатации рассматриваемой системы, что и обуславливает использование полученных данных в целях уточнения результатов теоретического исследования. Необходимо подчеркнуть значительную ресурсоёмкость и временные издержки, связанные с реализацией натурального эксперимента. Тем не менее, с учётом поставленных целей и задач исследования, полная замена натуральных испытаний лабораторными или моделирующими методами оказывается некомплектной и неэффективной. Наиболее рациональным

решением выступает внедрение комплексного подхода, сочетающего в себе как натурные, так и моделирующие элементы исследования, что позволяет достичь оптимального соотношения между затратами и результативностью. Такой подход, обеспечивает необходимый баланс между достоверностью получаемых данных и экономическими показателями исследовательского процесса.

Таким образом, интеграция различных методологических подходов позволяет:

- снизить общую стоимость исследований
- уменьшить временные рамки проведения работ
- повысить надёжность получаемых результатов
- обеспечить комплексный характер анализа [170, 171, 172, 173, 174, 175].

Целью экспериментального исследования является подтверждение теоретического обоснования диагностического параметра, характеризующего износ сопла форсунки, приводящий к превышению допустимых значений дымности отработавших газов, позволяющего без дополнительной конструктивной доработки диагностировать несоответствие состава отработавших газов дизельного двигателя экологическим требованиям.

Задачи эксперимента:

- 1) Построение CFD-модели процесса впрыска. Анализ полученных результатов;
- 2) Анализ состояния исследуемой выборки топливных форсунок. Микроскопия сопловых отверстий;
- 3) Установка форсунок на двигатель, анализ длительности импульсов открытия форсунок, анализ дымности отработавших газов;
- 4) Построение регрессионной зависимости с использованием предложенной ранее модели и полученных экспериментальных данных.

3.2 Численное моделирование процесса впрыска и распыливания дизельного топлива в цилиндр двигателя

Для создания численной модели процесса впрыска использовался программный комплекс Star-CCM+. Simcenter STAR-CCM+ - это комплексное мультифизическое решение для моделирования¹ изделий и конструкций, работающих в реальных условиях.

Simcenter STAR-CCM+ обеспечивает автоматическое исследование и оптимизацию проекта в наборе инструментов моделирования для каждого инженера, позволяя эффективно исследовать все пространство проектирования, а не сосредотачиваться на сценариях проектирования в одной точке. Simcenter предоставляет ведущее в отрасли программное обеспечение вычислительной гидродинамики (CFD) для быстрого и точного моделирования практически любой инженерной проблемы, связанной с жидкостями, конструкциями и всей связанной с ними физикой [96]. CFD моделирование широко применяется для расчётов протекания различных гидрогазодинамических процессов, в том числе впрыска и сгорания различных видов топлива [93, 94, 95] Модель создана с учётом основных технических характеристик двигателя 4Н11, которые представлены в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Технические характеристики двигателя Isuzu 4HF1.

Рабочий объём, см ³	4334
Диаметр цилиндра, мм	112
Ход поршня, мм	110
Мощность, л.с. при об/мин	130 при 3200
Крутящий момент, Нм при об/мин	310 при 1800
Степень сжатия	19:1
Давление конца такта сжатия, кПа	3040
Последовательность работы	1-3-4-2

¹ Результаты моделирования получены в 2020 году.

При создании модели учитывались реальные характеристики ТА, двигателя и используемого топлива. Некоторые используемые при расчётах модели параметры представлены в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Параметры, используемые при расчётах.

Наименование параметра	Значение	Размерность
Объем цилиндра	0,004334	м ³
Диаметр соплового отверстия d_c	0,00035	м
Скорость истечения топлива теоретическая V_t	680,940526	м/с
Площадь сопловых отверстий	0,0000006	м
Коэффициент поверхностного натяжения	0,029	н/м
Действительная скорость истечения V_∂	476,6583682	м/с
p_1 давление впрыска	50...200	МПа
p_2 давление в камере	3040000	Па
Динамическая вязкость топлива μ'	0,0034	Н·с/м ²

Моделирование проводилось в 4 режимах:

- форсунка с исправным распылителем, минимальное давление впрыска;
- форсунка с исправным распылителем, максимальное давление впрыска;
- форсунка с гидроабразивным износом распылителя, минимальное давление впрыска;
- форсунка с гидроабразивным износом распылителя, максимальное давление впрыска.

В моделировании использовались следующие физические модели: *K-Epsilon* модель турбулентности, допустимая двухслойная *K-Epsilon*, осреднённое по

Рейнольдсу уравнение Навье-Стокса, модель разделённого течения, эйлера многофазность и некоторые другие.

В ходе разработки моделей течения газовых смесей должны приниматься во внимание связанные с феноменом диффузии процессы переноса.

Поскольку диффузионные показатели отдельных составляющих смеси различны, в результате могут возникнуть различные явления. При решении задачи сверхзвукового обтекания тел учёт многосоставного характера газовой смеси представляет собой одну из наиболее важных проблем. Вследствие процессов диффузии к поверхности обтекаемого тела может дополнительно поступать тепло, что обуславливает значимость правильного отражения параметров процесса диффузии. Кроме того, решение целого ряда внутренних задач также требует подробного и корректного описания движения газовых сред и его результатов. Именно такие задачи решаются при использовании модели Навье-Стокса [103].

Метод конечных элементов используется для определения параметров протекающих процессов. Область поиска решения дифференциальных уравнений разделяется на некоторое конечное число составляющих или подобластей, в каждой из которых произвольно определяется вид аппроксимирующей функции (в самом простом случае – полином 1-й степени). Аппроксимирующая функция вне соответствующей подобласти равна 0. В узлах, т.е. на границах подобластей, значения функций заранее неизвестны (т.е. представляют собой решение задачи). Как правило, показатели аппроксимирующих функций определяются в соответствии с тем, что в узлах значения смежных функций равны. Данные показатели в дальнейшем отражаются в значениях функций на границах подобластей. Формируется система линейных алгебраических уравнений, число которых соответствует числу неизвестных значений на границах подобластей, где ищется решение исходной системы; данное значение прямо пропорционально числу подобластей и ограничено исключительно возможностями вычислительной техники.

Поскольку число связанных с каждым элементом подобластей ограничено, система линейных алгебраических уравнений характеризуется разрежённым видом, что упрощает её решение [97, 98, 99, 100, 101, 102].

Результаты моделирования представлены на рисунках 3.2 ...3.5.

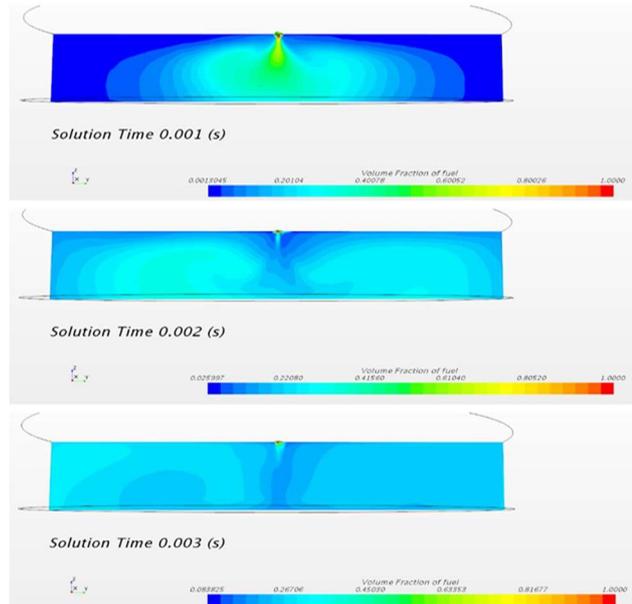


Рисунок 3.2 – Распределение концентрации топлива по объёму камеры сгорания, распылитель без гидроабразивного износа, давление впрыска минимальное (в плоскости продольного сечения, проходящей через распылитель)

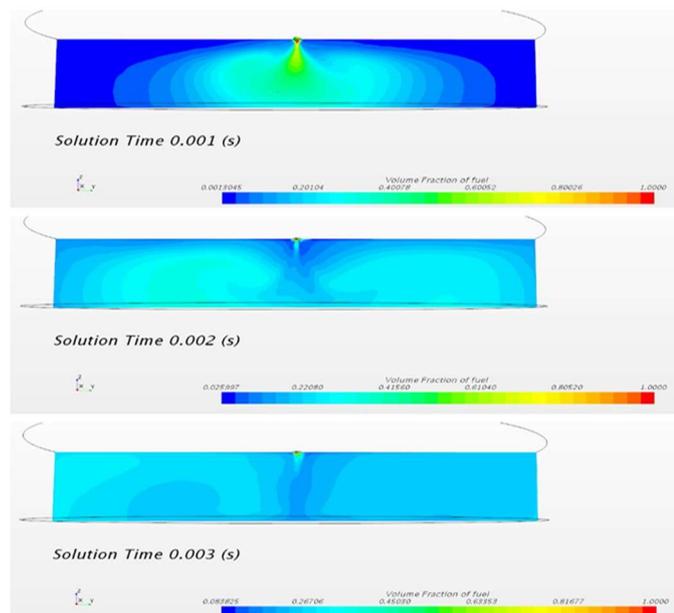


Рисунок 3.3 – Распределение концентрации топлива по объёму камеры сгорания, распылитель без гидроабразивного износа, давление впрыска максимальное (в плоскости продольного сечения, проходящей через распылитель)

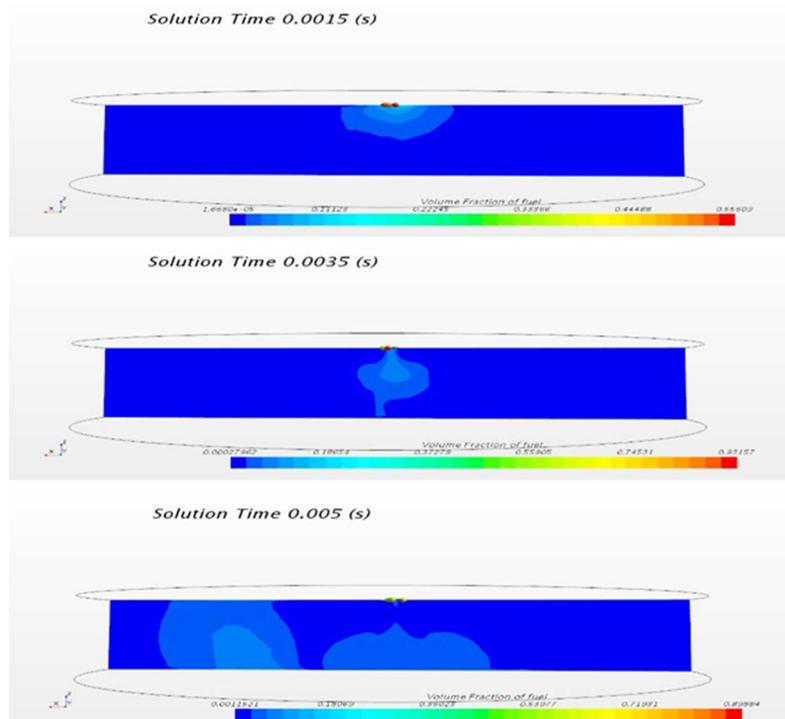


Рисунок 3.4 – Распределение концентрации топлива по объёму камеры сгорания, распылитель со следами гидроабразивного износа, давление впрыска минимальное (в плоскости продольного сечения, проходящей через распылитель)

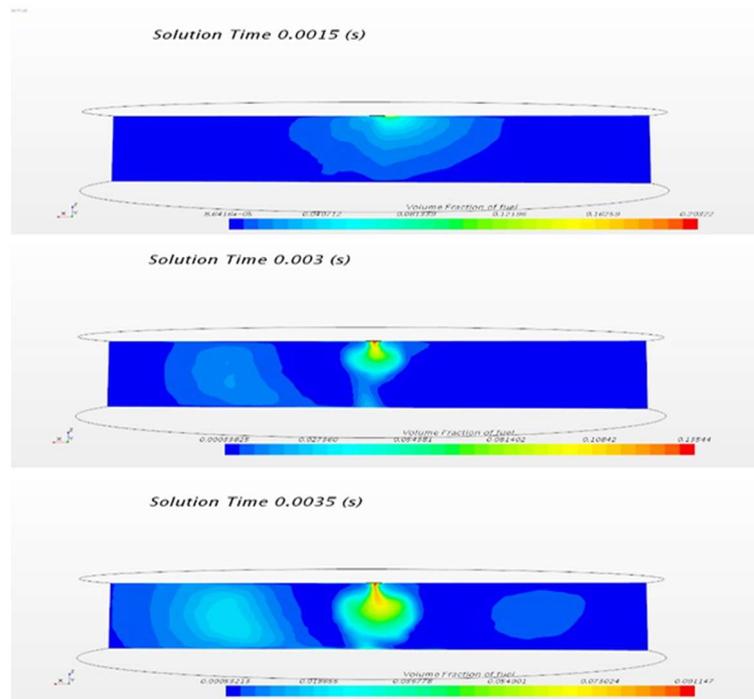


Рисунок 3.5 – Распределение концентрации топлива по объёму камеры сгорания, распылитель со следами гидроабразивного износа, давление впрыска максимальное (в плоскости продольного сечения, проходящей через распылитель)

При исправном распылителе наблюдается относительно равномерное распределение топлива по всему объёму камеры сгорания. При этом происходит хорошее распыливание топлива без образования крупных капель.

Значение функции Volume fraction of fuel (f_{xs}), позволяющее оценить распределение частиц топлива при заданных условиях по объёму камеры сгорания, находится в диапазоне $f_{xs} = 0,26..0,5$ по всему объёму цилиндра при $t=3$ мс, при максимальном и минимальном давлении впрыска.

При запуске симуляции с повреждённым распылителем (изменена характеристика распылителя $\mu_c * f_c$, соответствующая изменению формы и размеров сопловых отверстий при гидроабразивном износе):

- [среднее значение $f_{xs}=0,085$], то есть топливо значительно хуже распределяется по всему объёму камеры сгорания
- [локальное у распылителя $f_{xs}=0,87$ при $t=3$ мс] для максимального давления впрыска, что говорит о снижении качества распыливания топлива (т.е. увеличение среднего диаметра капель по Заутеру) и об образовании крупных капель.

При минимальном давлении среднее значение $f_{xs}=0,15$, в районе распылителя $f_{xs} = 0.89$, что, как и в предыдущем случае говорит об ухудшении качества распыливания и равномерности распределения топлива по камере сгорания, при этом функция обнаружения крупных капель фиксирует их скопление у распылителя (см. рисунок 3.4 и 3.5 - красные точки у распылителя).

С помощью модельного метода экспериментального исследования подтверждено существенное влияние параметра $\mu_c * f_c$ на качество распыливания и равномерность распределения топлива по камере сгорания, а также проведена оценка изменения количества топлива, фактически попавшего в камеру сгорания за время, соответствующее длительности впрыска в режиме свободного ускорения коленчатого вала дизельного двигателя. CFD моделирование показало, что при изменении суммарной площади сопловых отверстий на 5% и изменению их формы, соответствующему гидроабразивному износу (остальные параметры

неизменны в процессе моделирования), количество топлива в объёме камеры сгорания увеличивалось $\approx 10,25\%$. Опираясь на теоретические модели образования сажи при сгорании топлива в цилиндрах, приведённых в главе 2 диссертационного исследования, можно говорить о том, что подобное увеличение количества топлива приведёт к увеличению концентрации частиц сажи в отработавших газах исследуемого двигателя на $\approx 2..9\%$.

3.3 Экспериментальное исследование зависимости дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от длительности впрыска

3.3.1 Описание приборов и оборудования, используемого в экспериментальном исследовании

Для получения и последующего анализа управляющих сигналов на форсунки использовался осциллограф MT Pro 4.1 - профессиональный осциллограф для диагностирования различных систем автомобиля. Комплект оборудования включает в себя все необходимое оборудование для проведения подробного тестирования систем зажигания, впрыска и бортовой сети. Все работы проводятся при подключении датчиков непосредственно к диагностируемым системам без использования адаптеров.

MT Pro 4.1 обладает 8 аналоговыми и 1 логическим каналами, информация с которых поступает одновременно. Общий вид прибора и применяемые для измерений провода представлены на рисунках 3.6 и 3.7.

MT Pro 4.1 подключается к ПК и используется совместно со специализированным программным обеспечением, позволяющим анализировать, записывать и масштабировать полученные сигналы, задавая необходимый уровень точности. Интерфейс ПО MT4 pro представлен на рисунке 3.8.



Рисунок 3.6 – Провод с измерительной иглой для измерений



Рисунок 3.7 – Осциллограф МТ 4.1 Pro

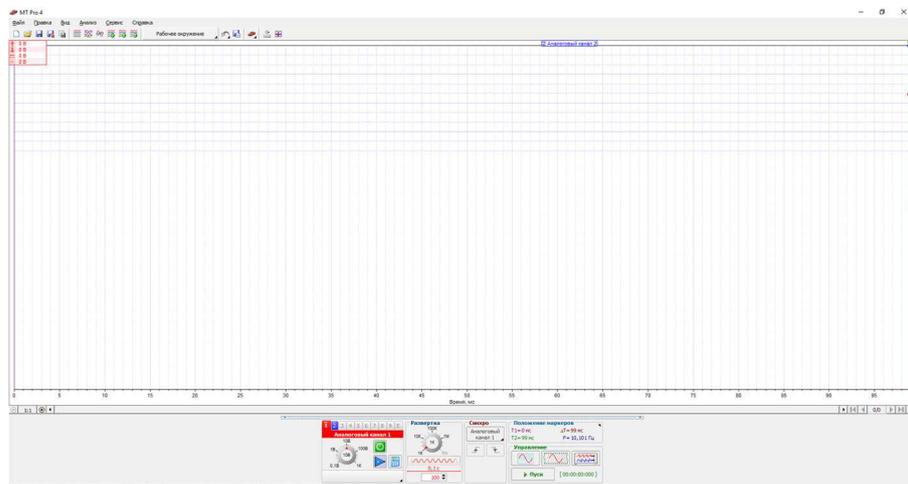


Рисунок 3.8 –Интерфейс ПО МТ4PRO

Для анализа состояния сопловых отверстий распылителя, состояния иглы и её посадочного места использовалась выборка форсунок для двигателя 4НЛ1. Форсунка в сборе и её компоненты представлены на рисунках 3.9, 3.10 и 3.11.



Рисунок 3.9 – Топливная форсунка исследуемого двигателя



Рисунок 3.10 – Топливная форсунка исследуемого двигателя в разобранном виде



Рисунок 3.11 – Распылитель и игла исследуемой форсунки

Для оценки износа необходимо проводить микроскопию иглы и распылителя форсунки. Для проведения микроскопии применяется цифровой USB-микроскоп с возможностью увеличения до 1000 X (рисунок 3.12). Характеристики микроскопа представлены в таблице 3.3.



Рисунок 3.12 – Цифровой USB-микроскоп

Таблица 3.3 – Характеристики USB микроскопа 1000X.

Характеристики USB микроскопа 1000X	
Сенсор	0.3 Мп (CMOS)
Контроллер	High Speed DSP
Увеличение	40 ~ 1000X
Фокус	10–40 мм, ручной
Частота кадров	30 кадров/сек
Подсветка	светодиодная (600 люкс) с регулировкой яркости
Формат фото	JPEG, BMP
Формат видео	AVI
Захват видео и фото	640x480, до 1600x1200

Таблица 3.3 – Продолжение

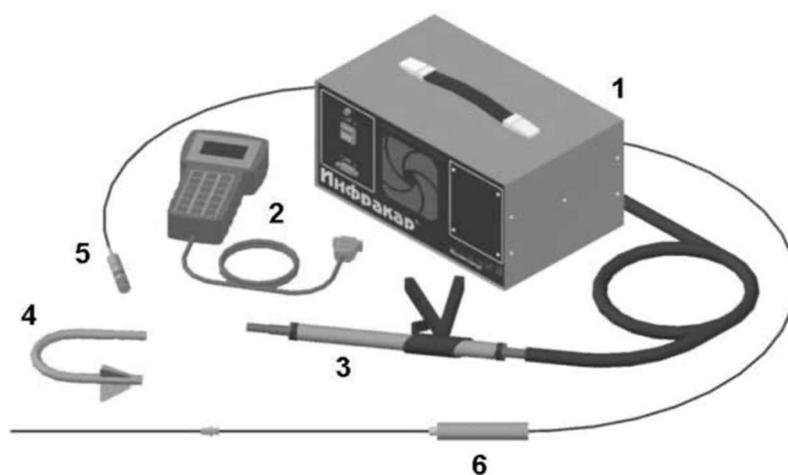
Интерфейс	USB 2.0 и USB 1.1
Операционная система	Windows XP/Vista/7/8/10 32 bit, 64 bit
Материал оптики	оптическое стекло

Контроль дымности отработавших газов осуществлялся с помощью переносного анализатора ИНФРАКАР Д (рисунок 3.13), предназначенного для измерения дымности отработавших газов дизельных двигателей, а также для измерения и контроля частоты вращения коленчатого вала автомобилей с 4-х тактным двигателем и величины температуры моторного масла двигателя.

Конструктивно дымомер состоит из:

- измерительного оптического блока;
- пульта дистанционного управления;
- пробоотборника.

В основе работы анализатора выхлопов лежит оптико-абсорбционный принцип, который заключается в просвечивании потока отработавших газов и анализе поглощения света.



1 - оптический блок; 2 - дистанционный пульт управления; 3 - зонд для горизонтально расположенной выпускной системы с пробоотборным шлангом; 4 - зонд для вертикально расположенной выпускной системы с пробоотборным шлангом; 5 - датчик частоты вращения коленчатого вала; 6 - датчик температуры масла

Рисунок 3.13– Комплект дымомера ИНФРАКАР

3.3.2 Методика проведения микроскопии исследуемой выборки форсунок для определения состояния элементов

Для оценки состояния элементов форсунок применялась микроскопия с разной кратностью увеличения $\approx 50 \dots 1000$. На первом этапе проводится исследование сопловых отверстий. Для этого использовались форсунки, эксплуатировавшиеся на двигателе 4Н11 на протяжении 30..80 тыс. км пробега. Обнаруженные дефекты исследуемых распылителей представлены на рисунках 3.14 ... 3.17, места повреждений отмечены цифрами. Увеличение площади сечения соплового отверстия в результате повреждений составило $\approx 15\%$. Также на одном распылителе из комплекта обнаружено закоксовывание сопловых отверстий.



Рисунок 3.14 – Сопловое отверстие со следами износа, распылитель №1



Рисунок 3.15 – Сопловое отверстие со следами износа, распылитель №2



Рисунок 3.16 – Сопловое отверстие со следами износа распылитель №3



Рисунок 3.17 – Сопловое отверстие со следами износа распылитель №4

На втором этапе проводится исследование игл. Среди исследованных форсунок заметные следы износа были обнаружены на форсунке одного из 10 исследуемых комплектов. Цифрами 1 и 2 обозначены задиры на игле, приводящие к заклиниванию иглы и потере герметичности форсунки. Сравнение дефектной иглы с нормальной представлено на рисунке 3.18.

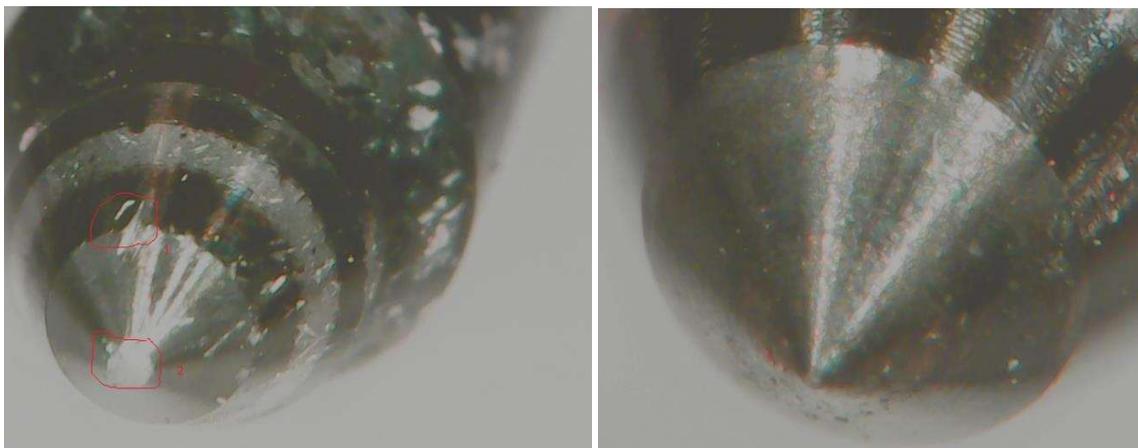


Рисунок 3.18 – Сравнение дефектной иглы (слева) и иглы без следов износа (справа)

В ходе проведения эксперимента использовались форсунки со следами гидроабразивного износа для последующей установки в двигатель и анализа взаимосвязи длительности впрыска и дымности ОГ. Кроме длительности впрыска контролировались также такие параметры, как давление в рампе, давление наддува, частота вращения коленчатого вала, положение педали и др. Полученные результаты и их анализ будут представлены ниже приведены в подпункте 3.5.3.

3.3.3 Методика проведения экспериментального исследования по уточнению эмпирических коэффициентов зависимости дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от длительности впрыска

Экспериментальное исследование проводилось на нескольких комплектах форсунок с разной степенью износа. Для анализа управляющих импульсов измерительные щупы осциллографа подключаются к сигнальным проводам топливных форсунок, диагностический адаптер подключается к разъёму OBD II. Щупы массы подключаются к ближайшей точке «массы». При этом, согласно руководству по эксплуатации и некоторым исследованиям в этой области [104] при многоканальной записи параметров необходимо использовать общую точку массы. Так же из-за индуктивности форсунки в обмотке электромагнитного клапана возникает импульс самоиндукции, достигающий значений в несколько десятков вольт, поэтому необходимо использовать вход осциллографа с делителем. Подключение к форсунке и необходимый комплект оборудования представлены на рисунках 3.19 и 3.20.

Для достижения необходимой точности при проведении измерений требуется обеспечить их выполнение в условиях установившегося режима, однако методика проверки, представленная в ГОСТ 33997-2016, предполагает измерение дымности только на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя,

что накладывает определённые ограничения на методологию проведения экспериментов.

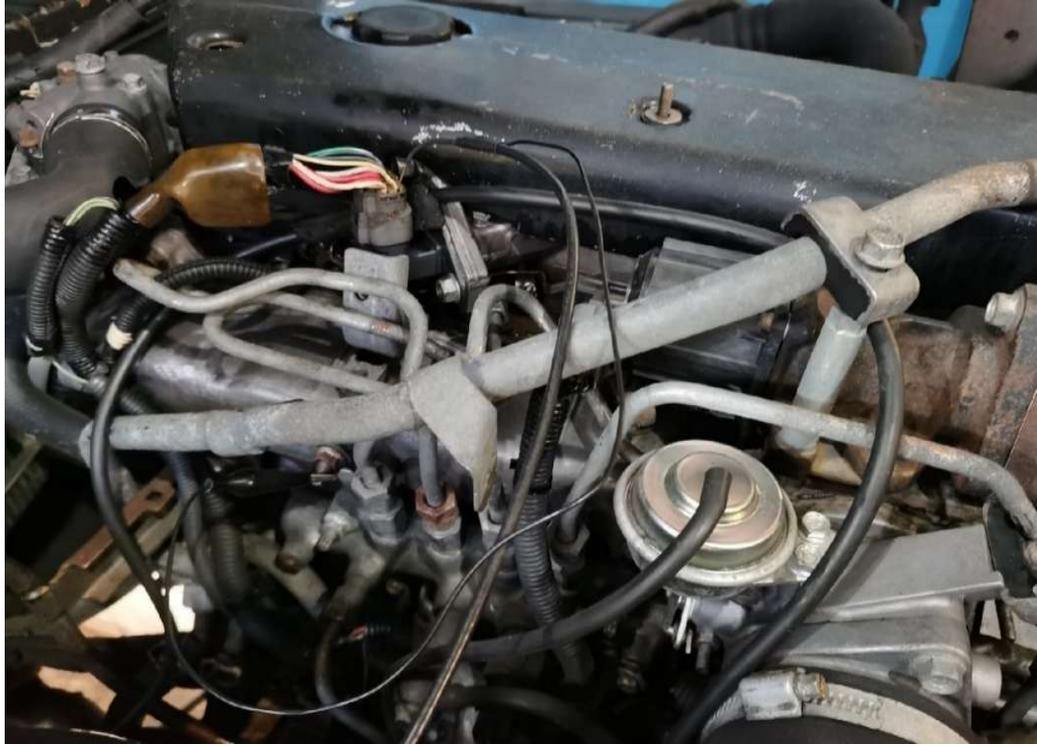


Рисунок 3.19 – Подключение к сигнальным проводам форсунок.



Рисунок 3.20 – Комплект для подключения

Примеры осциллограмм, полученных на исследуемом двигателе представлены на рисунках 3.21 ... 3.23[143].

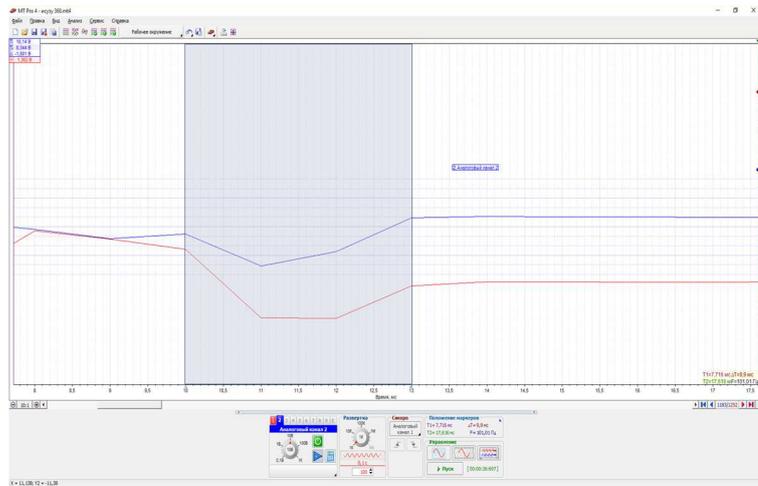


Рисунок 3.21 – Осциллограмма, полученная с исправного комплекта форсунок

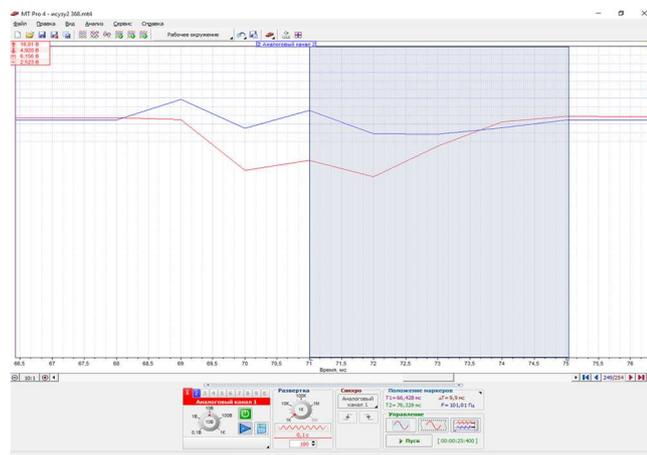


Рисунок 3.22 – Осциллограмма, полученная с комплекта форсунок с незначительной степенью износа.

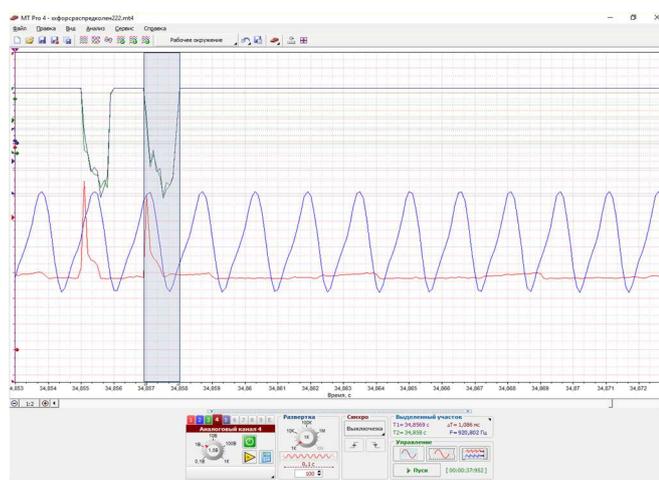


Рисунок 3.23 – Осциллограмма, полученная с комплекта форсунок со значительными следами гидроабразивного износа.

Массив полученных значений составил более 1000 записей, из них более 40 соответствуют замерам дымности в режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя. Контроль параметров осуществлялся при подключении к бортовой системе самодиагностики. Дымность контролировалась с помощью дымомера ИНФРАКАР Д. Фрагмент полученного массива значений приведён в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Фрагмент массива значений, полученных из бортовой сети самодиагностики автомобиля

Дымность - k	Время впрыска - $t_{впр}$	Давление топлива в рампе - $P_{рамп}$	Давление воздуха во впускном коллекторе - $P_{абс}$	Частота вращения коленчатого вала двигателя - $N_{обор}$	Температура воздуха на впуске - $T_{вп}$	Открытие клапана EGR - EGR_{rate}
1,10	3,10	570	16	3633	30	1
1,03	3,15	530	16	3518	31	2
1,24	3,00	490	15	3378	29	1
1,33	2,95	570	17	3646	30	0
1,33	2,95	580	16	3470	30	2
0,98	3,20	560	16	3611	29	1
0,82	3,40	560	15	3411	28	1
0,84	3,85	570	17	3522	30	0
1,41	2,90	540	16	3560	29	1
1,61	2,80	560	16	3496	30	1
1,72	2,75	570	15	3547	25	2
1,41	2,90	560	17	3386	30	1
1,51	2,85	530	17	3517	28	0
1,83	2,70	570	17	3447	30	1
1,96	2,65	570	16	3491	30	1
1,96	2,65	570	16	3446	30	2
2,99	2,30	560	15	3628	30	1
2,36	2,50	540	17	3456	30	0
2,51	2,45	520	16	3517	27	1
3,34	2,20	570	16	3422	34	1
2,82	2,35	560	16	3584	29	2
2,36	2,50	570	17	3587	30	1
1,96	2,65	540	16	3452	30	0
2,82	2,35	560	16	3364	30	1
2,99	2,30	550	17	3507	30	2

Таблица 3.4 – Продолжение

2,51	2,45	570	17	3548	28	1
1,83	2,70	570	16	3480	30	0
1,96	2,65	580	16	3536	30	1
2,36	2,50	570	16	3411	31	1
1,61	2,80	570	17	3536	30	0
1,51	2,85	560	16	3566	23	1
1,83	2,70	570	16	3354	30	0
2,36	2,50	560	16	3390	29	1

Зонд дымомера был установлен в выпускную систему автомобиля Isuzu elf (рисунок 3.24), а уровень дымности ОГ контролировался на дисплее пульта дымомера (рисунок 3.25)[143].



Рисунок 3.24 – Установка пробоотборного зонда дымомера



Рисунок 3.25 – Дисплей пульта для контроля результатов измерений.

Для формирования регрессионной модели, описывающей взаимосвязь значений дымности с параметрами, контролируемые электронным блоком управления, была определена матрица парных корреляций на основе коэффициентов корреляции Пирсона между основными параметрами, входящими в формулу (10). Результаты расчётов парных корреляций представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Матрица парных корреляций

	Дымность - k	Время впрыска - $t_{впр}$	Давление топлива в рампе - P_T	Давление воздуха во впускном коллекторе - P_B	Частота вращения коленчатого вала двигателя - $N_{обор}$	Температура воздуха на впуске - $T_{вп}$	Открытие клапана EGR - EGR_{rate}
k	1						
$t_{впр}$	-0,93	1					
P_T	0,089	-0,05	1				
P_B	0,049	-0,02	0,18	1			
$N_{обор}$	0,079	-0,10	-0,13	-0,21	1		
$T_{вп}$	0,24	-0,15	0,17	0,21	0,17	1	
EGR_{rate}	0,17	-0,19	0,04	-0,35	-0,01	-0,11	1

Сопоставление полученных значений коэффициентов корреляции со шкалой Чеддока говорит о наличии очень высокой отрицательной связи между дымностью отработавших газов и длительностью впрыска ($r = -0,93$). При этом взаимное влияние других параметров друг на друга и на длительность впрыска можно оценить как слабое или не существующее ($-0,02 \leq r \leq 0,18$). Проверка полученных значений с помощью t-критерия Стьюдента говорит об их статистической значимости.

Для определения вида указанной функциональной зависимости была построена и проанализирована представленная на рисунке 3.26 диаграмма размещения.

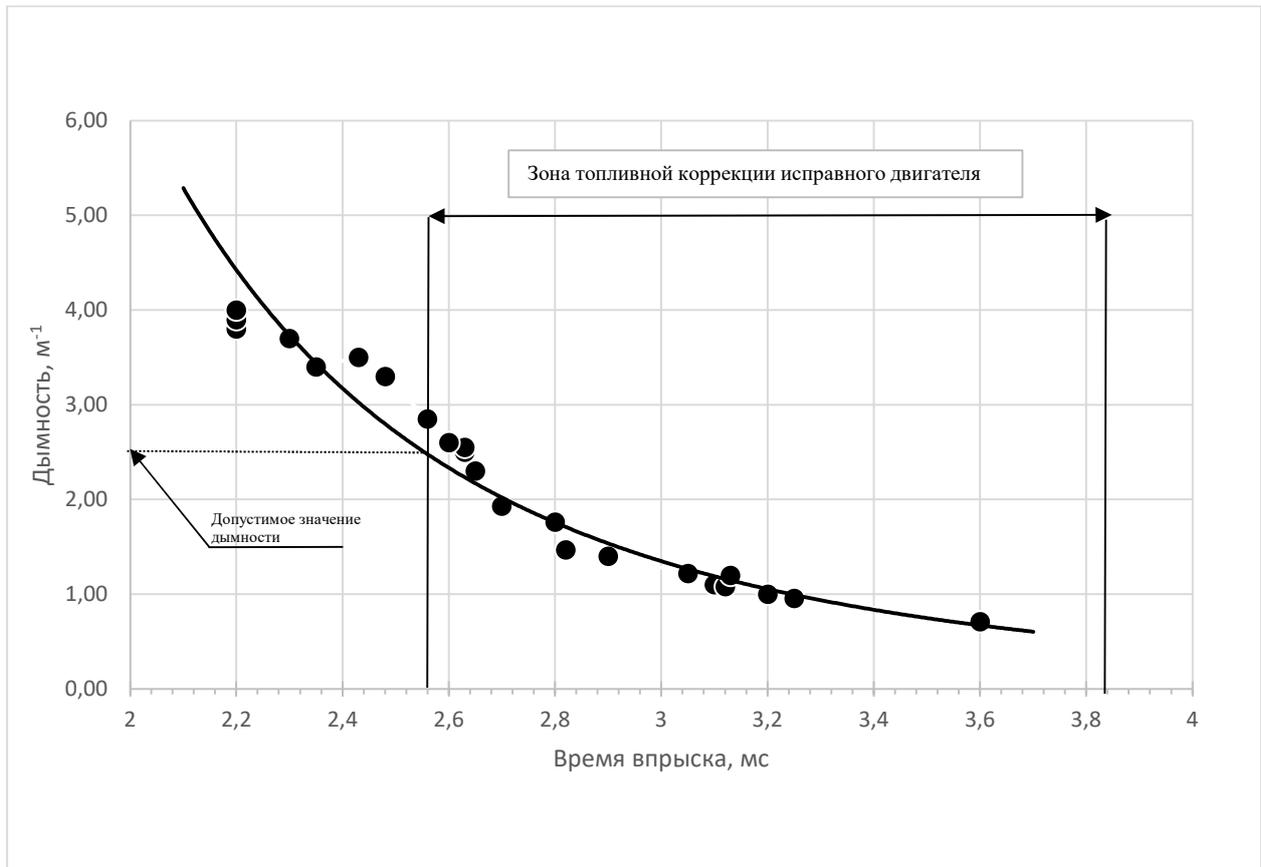


Рисунок 3.26 – Зависимость дымности ОГ дизельного двигателя от времени открытия форсунки.

$$y=90,76x^{-3,831} \quad (3.1)$$

Получено уравнение (3.1) – степенная функция с коэффициентом детерминации (КД) $R^2 = 0,94$, $x = \tau_{\text{впр}}$ – длительность впрыска, минимальное значение для исследуемого блока управления составляет 2,2 мс, дальнейшее сокращение длительности впрыска топлива невозможно, $y = k$ – дымность отработавших газов.

Рассчитанные значения коэффициента детерминации говорят об адекватности полученных моделей. Полученные значения коэффициентов регрессии применимы только для двигателя Isuzu 4NJ1. Для использования с другими двигателями коэффициенты уравнений регрессии будут иметь другие значения. Однако обоснованная зависимость дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от длительности впрыска топлива в части ее характера универсальна для дизельных двигателей с электронным управлением впрыска топлива. Уравнение описывает поведение

$f(\tau_{\text{впр}})$ при различных значениях длительности впрыска, и учитывает изменения, возникающие также и при снижении производительности форсунки т.е. закоксовывании сопловых отверстий топливных форсунок. Применение ИНС позволяет полностью исключить этап сбора и обработки информации для математического описания взаимосвязи между диагностическим параметром и изменением технического состояния, исследуемого АТС.

Также необходимо проверить исследуемый параметр на соответствие требованиям, предъявляемым к диагностическим параметрам. Параметр однозначен - экстремумов в диапазоне измерений нет. Выходной параметр (дымность) быстро изменяется при изменении диагностического, то есть параметр чувствителен. При неизменном значении структурного параметра рассеивание диагностического параметра невелико, то есть параметр стабилен. Площадь пересечения областей плотностей распределения исправного и неисправного состояния невелика, что говорит об информативности диагностического параметра. Для оценки полезного эффекта от применения разработанной модели (на примере одного из исследованных комплектов форсунок) необходимо оценить скорость достижения состояния, соответствующего превышению дымности (при 80 тыс. км значения дымности превысили $4,2 \text{ м}^{-1}$). С учётом известного интервала проверки (в среднем для АТП 60 дней) и известного среднесуточного пробега можно оценить скорость роста дымности ОГ как отношение изменения дымности ко времени достижения критического состояния, в представленном случае $0,01 \text{ м}^{-1}/\text{день}$. После чего можно оценить количество дней с превышением дымности, попадающих в межинспекционный интервал – в данном случае 30 дней. С учётом пробеговых выбросов и фактического значения дымности для одного автомобиля, своевременно выявленное с использованием разработанной модели превышение дымности позволит предотвратить выброс $19,68 \text{ г}$ сажи, то есть снизить выброс сажи на $6,3\%$. При больших значениях межинспекционного интервала снижение выбросов сажи за счет использования разработанной модели может достигать $73,5\%$.

Выводы по третьей главе

В третьей главе описано проведенное экспериментальное исследование, определяющее взаимосвязи между параметрами, используемыми блоком управления дизельного двигателя и дымностью отработавших газов: анализ процесса впрыскивания и распыливания топлива форсунками системы Common Rail на базе CFD-модели; микроскопия сопловых отверстий форсунок двигателя Isuzu 4HF1; собраны и обработаны экспериментальные данные для уточнения математической модели зависимости дымности отработавших газов от износа топливных форсунок. По его результатам можно сделать следующие основные выводы:

1. Для создания численной модели процесса впрыска использовался программный комплекс Star-CCM+. Simcenter STAR-CCM+, с помощью которого построена CFD-модель, учитывающая характеристики исследуемого двигателя для уточнения необходимой степени износа сопловых отверстий. Моделирование, проведенные в 4 режимах (форсунка с исправным распылителем, минимальное давление впрыска; форсунка с исправным распылителем, максимальное давление впрыска; форсунка с гидроабразивным износом распылителя, минимальное давление впрыска; форсунка с гидроабразивным износом распылителя, максимальное давление впрыска) подтвердило существенное влияние износа сопловых отверстий форсунки на качество распыла топлива и его равномерность распределения по камере сгорания.

2. Для обоснования зависимости дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от длительности впрыска топлива проведено экспериментальное исследование, заключающееся в одновременной фиксации длительности впрыска топлива и значений дымности отработавших газов при применении комплектов форсунок с заведомо изношенными сопловыми отверстиями, что подтверждено микроскопией.

3. Результатом экспериментального исследования стало подтверждение наличия устойчивой взаимосвязи (представлены аналитические и графические зависимости) между используемыми блоком управления двигателем параметрами, износом сопловых отверстий и/или посадочного места и/или иглы топливных форсунок и дымностью отработавших газов. Таким образом установлена зависимость дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от длительности впрыска топлива дизельного двигателя Isuzu 4hj1[143]. Результаты расчёта коэффициента детерминации ($R^2=0,95$) говорят об адекватности полученной модели взаимосвязи между длительностью впрыска и дымностью отработавших газов.

4. Полученная зависимость дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от длительности впрыска топлива в части ее характера универсальна для дизельных двигателей с электронным управлением впрыска топлива, использующих как механические, так и электрогидравлические топливные форсунки системы Common Rail и будет отличаться для других двигателей только значениями коэффициентов регрессии.

4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ДИЗЕЛЬНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

4.1 Разработка программно-аппаратного комплекса для реализации метода повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями

Для применения разработанной математической модели на внешнем устройстве необходимо передавать этому устройству значения параметров, используемых электронным блоком управления, в режиме реального времени. Получить значения этих параметров возможно различными способами, но самый удобный это использовать возможности, предоставляемые системой бортовой самодиагностики. Блок управления двигателем получает информацию от различных датчиков автомобиля, а также обменивается информацией с другими блоками управления, установленными в автомобиле, поэтому имеется возможность в реальном времени запрашивать у него информацию необходимую для работы программно-аппаратного комплекса и также в реальном времени получать актуальный ответ.

Информационное взаимодействие с блоком управления двигателем стандартизировано и происходит по шине передачи данных, например CAN, K-LINE и др., в соответствии с протоколом подключения к системе бортовой самодиагностики. В большинстве эксплуатируемых на данный момент автомобилей используется стандартизированный диагностический разъём подключения к этой системе, так называемый OBD2.

Далее необходимо решить вставшие вопросы подключения к блоку управления двигателем, получения необходимой информации от этого блока, программной реализации математической модели, аппаратной составляющей для выполнения ранее программно-реализованной математической модели, передаче

информации от блока управления двигателем в модель и отображение результатов моделирования.

Программная реализация на одном из языков программирования высокого уровня (С, С++, С#, python, языки программирования для смартфонов, планшетов) созданной математической модели не должна вызвать трудностей.

Идеальным вариантом внедрения разработок был бы дополнительный модуль в программе управления двигателем. Он не потребовал бы создания никаких дополнительных аппаратных устройств, вмешательства в схемотехнику ТС. Но этот вариант на данный момент невозможен по причине закрытости прошивок (программ управления) блоков управления двигателем. Эти прошивки являются ноу-хау и интеллектуальной собственностью производителей, которые их тщательно охраняют от любого стороннего вмешательства.

Таким образом приоритетной является разработка собственного программно-аппаратного комплекса для решения поставленной задачи.

Можно обозначить следующие основные требования к такому программно-аппаратному комплексу:

- стоимость – должна быть минимальной;
- доступность компонентов;
- компактность – не должен занимать значимое место и мешать водителю, владельцу или проведению ТОиР;
- безопасность – не должен оказывать никакого влияния на штатные системы автомобиля;
- простота использования – водитель/владелец ТС должны понятно и наглядно информироваться о нарушении требований к дымности отработавших газов;
- простота установки – подключение данного программно-аппаратного комплекса не должно вызывать необходимость в регистрации изменения конструкции ТС.

Существует несколько путей реализации программно-аппаратного комплекса. Они основаны на стандарте OBD2.

Например, можно предложить прямое подключение к системе бортовой самодиагностики через стандартизированный разъём. Для этого потребуется разработать соответствующий контроллер, который будет получать информацию по шинам передачи данных, предусмотренным производителем автотранспортного средства, и переводить её в цифровой вид для дальнейшей обработки. Также потребуется разработать устройство, на котором будет выполняться программно-реализованная математическая модель, принимающая параметры от блока управления двигателем. В дополнение понадобится устройство индикации состояний (экран, светодиоды, звуковой сигнал или др.).

Преимущества данного подхода очевидны:

- устройство может быть довольно компактным;
- устройство можно разместить в любом месте по желанию проектировщика;
- дизайн может быть разработан в соответствии с дизайном конкретного ТС.

Недостатки:

- сложность и стоимость разработки;
- абсолютная «закрытость» устройства – отсутствие понимания не разработчиками «как это работает».

Как было сказано выше, есть несколько способов реализации программно-аппаратного комплекса. Если не использовать полный цикл разработки устройства, то можно предложить такой вариант – устройство собирается из уже давно присутствующих на рынке готовых стандартных модулей. Например, в качестве адаптера для подключения к системе бортовой самодиагностики широко используются устройства на базе микросхемы ELM327. Эта микросхема преобразует протоколы диагностических шин автомобилей в протокол RS-232 (известен как последовательный порт IBM совместимых компьютеров). Подобные адаптеры бывают с различными интерфейсами соединения с внешней

вычислительной техникой, а именно: проводные – USB, RS-232; беспроводные – Wi-Fi, Bluetooth.

К данному адаптеру можно подключиться с любого устройства обладающего возможностями терминала (например, обычный ноутбук с программой терминалом putty) и даже в ручном режиме отправлять на него команды/запросы и получать ответы.

Если использовать беспроводной интерфейс, то программную часть можно реализовать на любом современном компактном устройстве – смартфон, планшет, вплоть до умных часов. Этот вариант очень дешёв в реализации, но представляется неудобным из-за необходимости установки и настройки дополнительного ПО на устройства всех заинтересованных в получении информации лиц (контролёров ОТК, мастеров ТОиР, ответственных за выпуск ТС на линию, водителей, владельцев ТС и др.), а также необходимости запуска соответствующего программного модуля для получения информации.

Для получения полностью автономного устройства для работы разработанного метода потребуется автономное устройство способное взаимодействовать с адаптером ELM327. В качестве такого устройства способны выступить, к примеру контроллеры Arduino, STM32 или др. При автономном размещении на автомобиле всего устройства можно выбрать любой протокол взаимодействия между адаптером и контроллером, как проводной, так и беспроводной. Но для повышения стабильности передачи информации и удешевления конечного устройства, следует отдать предпочтение проводному подключению по интерфейсу RS-232. Это сократит количество модулей сопряжения протоколов, а, следовательно, и цену устройства, также повысит надёжность.

4.2 Разработка алгоритма работы программного обеспечения для реализации метода повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями

После выбора аппаратной части устройства потребуется разработка его программной составляющей. В зависимости от аппаратной части возможна большая вариативность в дополнительных функциях устройства, которые можно реализовать в виде ПО. Например, могут быть реализованы следующие дополнительные функции:

- в устройстве применён модуль WI-FI, при въезде в автопарк ТС автоматически подсоединяется к внутренней сети автопарка и отправляет текущие данные о работе топливной системы и расчётную дымность ОГ на сервер автопарка, откуда его могут получить заинтересованные отделы или, автоматически формируется заявка на диагностирование и ремонт;

- в устройстве применён модуль GPRS (4G, 5G), ТС на протяжении всего маршрута в режиме онлайн по сетям передачи данных сотовых операторов отправляет информацию о топливной системе и расчётную дымность ОГ на сервер автопарка, откуда его могут получить заинтересованные отделы или, автоматически формируется заявка на диагностирование и ремонт;

- в устройстве может быть установлена энергонезависимая память в достаточном количестве. Таким образом становится возможным реализовать накопление информации во времени о состоянии топливной системы и расчётной дымности ОГ и наглядно представить эту информацию для анализа, например, отобразив её в виде графика.

При этом, независимо от дополнительных функций, основная часть программного обеспечения будет идентична у всех реализаций устройства.

Обоснованные выше зависимости значений дымности отработавших газов от параметра, используемого блоком управления двигателем (длительности впрыска топлива) могут быть положены в основу метода повышения

экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями. Данный метод предполагает непрерывный контроль параметров, используемых блоком управления двигателем и выполнение оценки на их основе значения дымности отработавших газов. Для этого необходима разработка соответствующего программного обеспечения (ПО).

При разработке программного обеспечения, необходимо учесть указанные выше ограничения входных параметров, получаемых из бортовой системы самодиагностики автотранспортного средства. Устройство, на котором будет реализовано разрабатываемое программное обеспечение, будет хранить в энергонезависимой памяти базу данных с эталонными значениями параметров, характеризующих исправное состояние системы питания, цилиндропоршневой группы, впускного тракта, турбонаддува и т.д. Программа позволяет записывать эталонные значения параметров автомобиля в режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя, которые затем используются для сравнения с текущими данными. Пользователь может настраивать ключевые параметры расчёта дымности, такие как константа (C – значение регрессионного коэффициента k_0), показатель степени (α) (см. формулу 2.36) и ее максимально допустимое значение. Интерфейс программы включает таблицу для отображения текущих значений поддерживаемых PID-команд автомобиля, текстовое поле для логирования событий и график для визуализации изменений дымности в реальном времени. Программа поддерживает загрузку и сохранение эталонных данных в формате JSON, что обеспечивает удобство повторного использования. Для повышения удобства работы добавлена возможность сохранения пользовательских настроек, таких как коэффициенты и пороговое значение дымности, в конфигурационный файл. Приложение оснащено системой обработки ошибок и логирования, которая помогает пользователю быстро выявлять и устранять проблемы. Программа также предоставляет визуальные индикаторы статуса, такие как цветные метки для отображения превышения допустимой дымности. Благодаря своей универсальности и удобству использования, программа может быть применена как для профессиональной

диагностирования, так и для личного использования лицами, эксплуатирующими автотранспортные средства. В программе реализован демонстрационный режим, позволяющий пользователю ознакомиться со способом предоставления данных.

Преимуществом реализованного при разработке ПО подхода является универсальность полученного продукта, его можно адаптировать для определения состояния любых компонентов транспортного средства, связанных с параметрами, доступными для чтения в электронном блоке управления двигателем. Также процесс дополнения функционала является простым и универсальным. Алгоритм работы такого ПО представлен на рисунке 4.1. Интерфейс разработанного ПО представлен на рисунке 4.2.

«Альтернативой предложенному алгоритму может быть применение искусственных нейронных сетей для расчёта дымности отработавших газов по параметрам электронного блока управления. Одним из перспективных направлений в области контроля экологической безопасности транспортных средств является использование искусственных нейронных сетей (ИНС) для расчёта дымности отработавших газов на основе данных, получаемых с электронного блока управления (ЭБУ)» (Граевский И.С. 2024, 181) Современные автомобили оснащены сложными бортовыми системами, которые собирают и обрабатывают огромные объёмы информации о работе двигателя, включая параметры температуры, давления, состава топливовоздушной смеси, длительности впрыска и других характеристик. Эти данные формируют поток "больших данных" (Big Data), который характеризуется высокой скоростью генерации, разнообразием форматов и значительным объёмом. Традиционные методы анализа, основанные на аналитических зависимостях, часто не способны эффективно работать с такими массивами информации, что делает применение ИНС особенно актуальным.

Важно отметить роль больших данных и машинного обучения при выборе способа реализации. Искусственные нейронные сети обладают рядом уникальных преимуществ, которые позволяют им успешно справляться с задачами анализа больших данных. Во-первых, ИНС не требуют знания явных аналитических

зависимостей между исследуемыми параметрами. Вместо этого они используют механизм машинного обучения, который позволяет выявлять скрытые закономерности и корреляции в данных.

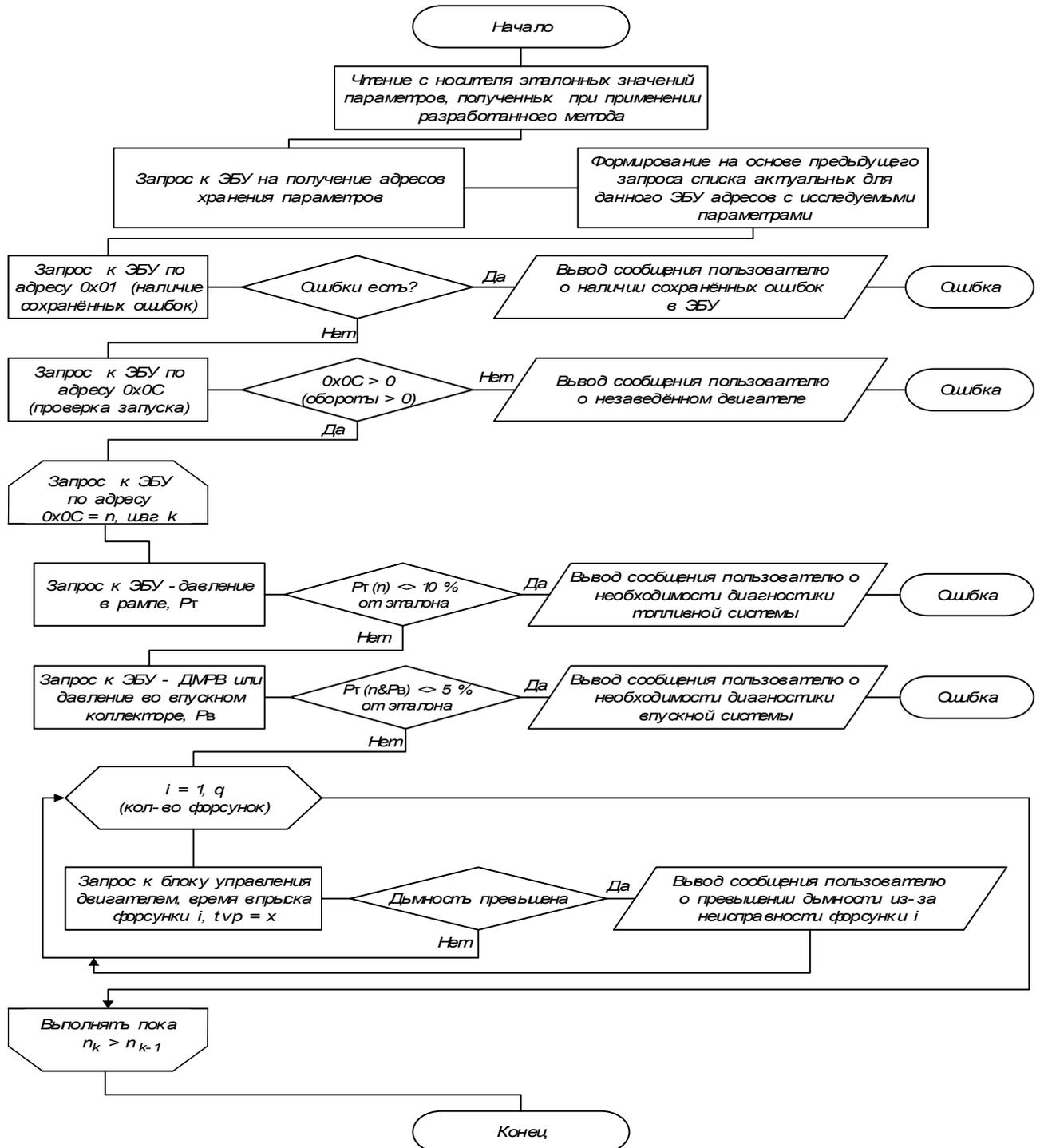


Рисунок 4.1 – Алгоритм работы ПО программно-аппаратном комплексе метода повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями

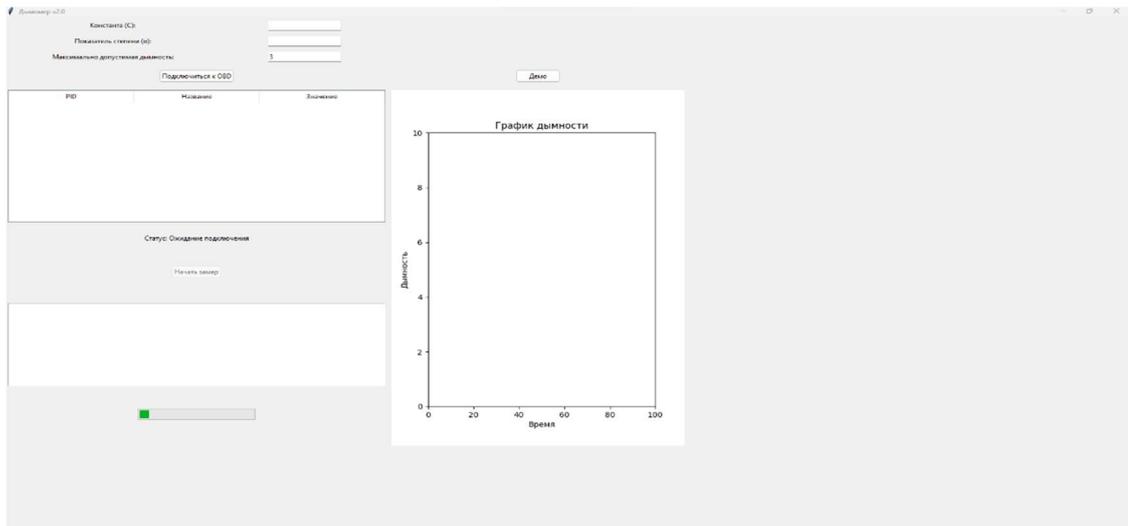


Рисунок 4.2 – Интерфейс разработанного ПО «Дымомер»

Например, для расчёта дымности отработавших газов нет необходимости строить сложные математические модели, учитывающие взаимосвязь между всеми параметрами, используемыми электронным блоком управления. Достаточно обучить нейросеть на исторических данных, где известны значения дымности и соответствующие показания датчиков, чтобы она могла прогнозировать этот параметр в реальном времени. Это значительно упрощает процесс разработки и внедрения системы мониторинга.

Во-вторых, ИНС способны обрабатывать большие объёмы данных с высокой скоростью и точностью, что особенно важно для работы в режиме реального времени. Бортовые системы автомобиля генерируют данные с частотой, измеряемой тысячами записей в секунду. Обработка таких массивов с использованием традиционных алгоритмов может быть затруднена из-за ограничений вычислительных ресурсов. Нейронные сети, напротив, могут быть оптимизированы для работы на современных аппаратных платформах, включая графические процессоры (GPU) и специализированные чипы для машинного обучения (например, TPU). Это позволяет выполнять анализ данных практически мгновенно, что критично для оперативного контроля выбросов.

Ещё одним важным преимуществом ИНС является их способность наглядно представлять результаты анализа и учитывать погрешности измерений.

Например, при расчёте дымности отработавших газов нейросеть может учитывать шумы в данных, вызванные нестабильностью работы датчиков или внешними факторами, такими как изменение условий окружающей среды. Кроме того, ИНС могут предоставлять результаты в виде графиков, диаграмм или числовых индикаторов, что упрощает интерпретацию данных как для водителей, так и для диагностов. Это особенно полезно в условиях эксплуатации, когда необходимо быстро принимать решения о техническом состоянии транспортного средства.

Создание нейронных сетей для анализа данных ЭБУ включает несколько этапов. Первый этап — это сбор и предобработка данных. Данные, получаемые с датчиков автомобиля, часто содержат шумы, выбросы и пропуски. Для их очистки применяются методы нормализации, фильтрации и заполнения пропущенных значений. Например, для снижения шума может использоваться фильтр Калмана или метод скользящего среднего. Также важно выполнить масштабирование данных, чтобы все входные параметры находились в одинаковом диапазоне значений, что улучшает сходимость обучения нейросети.

На втором этапе происходит выбор архитектуры нейронной сети. Для задач, связанных с анализом временных рядов, таких как расчёт дымности на основе данных ЭБУ, наиболее подходят рекуррентные нейронные сети (RNN) или их более современные варианты, такие как долговременная краткосрочная память (LSTM) и сети с механизмом внимания (Attention). Эти архитектуры способны учитывать последовательность данных и взаимосвязь между событиями, произошедшими в разные моменты времени. Например, изменение давления в коллекторе или температуры охлаждающей жидкости может быть связано с состоянием двигателя за несколько секунд до этого, и RNN/LSTM помогают учитывать такие зависимости.

Другим популярным подходом является использование многослойных перцептронов (MLP), которые представляют собой полносвязные нейронные сети. Они хорошо подходят для задач классификации или регрессии, где требуется установить связь между входными параметрами (например, температурой, давлением, длительностью впрыска) и выходным значением (дымностью). Для

повышения точности прогнозирования могут применяться ансамблевые методы, такие как комбинация нескольких нейросетей или использование методов бустинга.

Третий этап — это обучение нейронной сети. Для обучения используются алгоритмы обратного распространения ошибки (backpropagation), которые минимизируют функцию потерь (например, среднеквадратичную ошибку или кросс-энтропию). Важным аспектом является выбор гиперпараметров, таких как количество слоёв, количество нейронов в каждом слое, скорость обучения и регуляризация. Для улучшения обобщающей способности модели применяются методы кросс-валидации и дропаута (dropout), которые помогают избежать переобучения.

В ряде работ описывается возможность применения ИНС для расчёта количества выбросов бензиновых двигателей [132,176,177,178,179]. Формально можно говорить о том, что текущий состав отработавших газов может быть представлен вектором, состоящим из n - X компонентов:

$$X = (x_1; x_2; \dots x_n). \quad (4.1)$$

Значение каждого компонента равно текущему значению содержания определённого вредного вещества в выхлопе в своих единицах измерения (например, x_1 – объёмная доля CO, %; x_2 – объёмная доля СН, млн-1 и т.п.).

Предельно допустимые значения (устанавливаемые нормативной документацией) составляют вектор

$$X^{\text{доп}} = (x_1^{\text{доп}}; x_2^{\text{доп}}; \dots x_n^{\text{доп}}). \quad (4.2)$$

Как указано выше, механизм непрерывного контроля должен основываться не на контроле значения вектора X непосредственно, а позволять определять его по значению вектора косвенных оценочных параметров, состоящего из n^G компонентов.

$$G = (g_1; g_2; \dots g_n), \quad (4.3)$$

Для формирования вектора G в общем случае сначала определяется вектор из n^S диагностических параметров:

$$S = (s_1; s_2; \dots s_n). \quad (4.4)$$

Причём в общем случае $n^X \neq n^S$. Непосредственно при контроле технического состояния вектор диагностических параметров преобразуется в вектор результатов измерения, на основе которого и определяется вектор G .

$$Y = (y_1; y_2; \dots y_n), \quad (4.5)$$

В общем случае $n^S \neq n^G$, так как один оценочный параметр может рассчитываться на основе нескольких результатов измерений. Таким образом, задача непрерывного контроля сводится к расчёту по результатам измерений в каждый момент времени вектора G , определению на его основе вектора X и сравнению полученного значения с вектором $X_{\text{доп}}$.

Актуальным является также прогнозирование момента приближения значения X к $X_{\text{доп}}$. Это позволит предупредить эксплуатацию транспортного средства с нарушением экологических требований и выполнить необходимые работы по его приведению в надлежащее техническое состояние.

В этом случае можно говорить о формировании прогностической матрицы G^{Π} , состоящей из n^{Π} количества векторов G , значения которых зафиксированы через различные последовательные равные промежутки времени. На основании матрицы G^{Π} определяется интенсивность изменения вектора G и делается прогноз времени достижения вектором X значения $X_{\text{доп}}$. Если полученный результат равен или меньше заранее установленного времени информирования, то лицо,

эксплуатирующее транспортное средство, информируется о необходимости технического обслуживания или ремонта для предупреждения нарушения экологических требований.

Ключевым моментом последовательности действий является шаг «Формирование вектора состава отработавших газов X ». Как указано выше, для его выполнения необходимо установление взаимосвязи $G \rightarrow X$. Это значит, что для формирования вектора X необходимо выполнить своеобразное распознавание вектора G . В настоящее время рядом работ [176, 177, 178] описаны различные методы распознавания. Из всех существующих методов распознавания отдельно следует выделить детерминированные и вероятностные. Механизм непрерывного контроля предъявляет ряд требований к методу реализации, значит применение детерминированных методов для него невозможно. Применение ИНС уже доказало свою эффективность для решения подобных задач, что подтверждается рядом научных статей [143, 177, 180, 181]. Аппарат построения ИНС не предполагает аналитической и математической формализации зависимостей $G \rightarrow X$, закономерности в процессе обучения подбираются автоматически, хотя как правило в неявном виде, то есть без отображения пользователю. Это позволяет по набору значений диагностических параметров оценить содержание вредных веществ в отработавших газах. Алгоритм обучения ИНС представлен на рисунке 4.3.

Обученные ИНС позволяют также выполнять прогнозирование технического состояния [181]. Поэтому для реализации механизма непрерывного контроля в первом приближении предполагается использование именно искусственной нейронной сети [179].

В качестве входного сигнала для искусственной нейронной сети используется параметр длительности впрыска. Таким образом, количество нейронов во входном слое определено как $N_{in} = 1$. Выходной слой также содержит единственный нейрон ($N_{out} = 1$), который формирует прогнозируемое значение дымности выхлопных газов.

«Для тренировки модели была сформирована обучающая выборка на основе данных, полученных при непрерывном мониторинге в режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя. Данная база данных состоит более чем из 100 измеренных значений и обеспечивает надёжную основу для обучения нейросетевой архитектуры.

В результате сравнительного анализа различных конфигураций был выбран следующий оптимальный состав нейронной сети:

Количество нейронов во входном слое: $N_{in} = 1$

Количество нейронов в промежуточном слое: 2

Количество нейронов в выходном слое: $N_{out} = 1$

Тип активационной функции: сигмоидальная

Метод обучения: алгоритм обратного распространения ошибки

Разработанная модель показывает высокую точность при прогнозировании уровня дымности выхлопных газов в зависимости от длительности впрыска» (Граевский И.С., 2024, 181)

Результаты работы нейронной сети представлены в таблице 4.1, где демонстрируется соответствие между предсказаниями модели и реальными экспериментальными данными, не использованными при обучении.

Сравнительный анализ подтверждает способность созданной системы точно оценивать уровень дымности выхлопных газов без применения явно заданных математических соотношений между входными и выходными величинами, что указывает на эффективность обучения и высокую обобщающую способность построенной модели [143].

При непрерывном контроле длительности впрыска в процессе эксплуатации транспортного средства с помощью корректно обученной ИНС в i -тый момент времени, возможно определить значение $\tau_{впр\ испр}$.

По мере износа сопловых отверстий и иглы увеличивается объем топлива, подаваемого в камеру сгорания за время открытия форсунки. Это явление

вызывает неравномерность вращения коленчатого вала двигателя, которая регистрируется и анализируется электронным блоком управления [143].

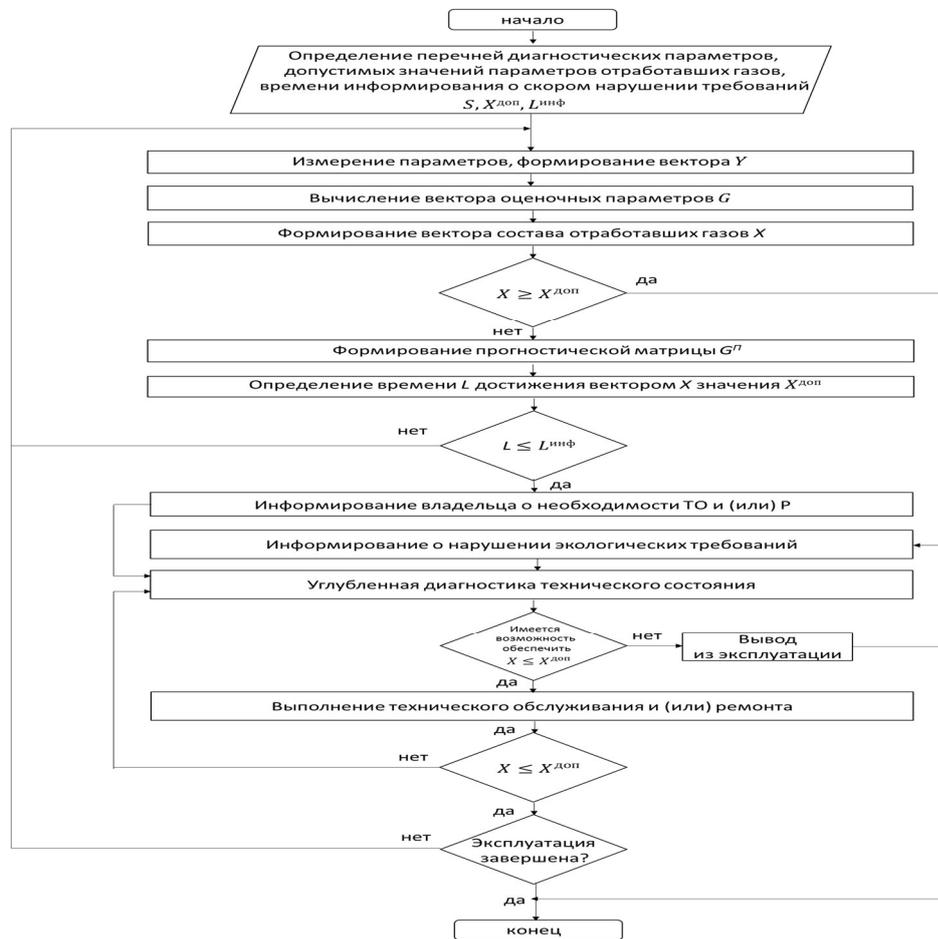


Рисунок 4.3 – Схема алгоритма обучения ИНС для применения в программно-аппаратном комплексе метода повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями, основанном на непрерывном контроле параметров, используемых электронным блоком управления.

Реагируя на возникшую неравномерность вращения, ЭБУ изменяет длительность впрыска, чтобы выровнять скорость движения поршней, однако диапазон такой регулировки ограничен. Таким образом, если выполняется $\tau_{\text{впр действ}} > \tau_{\text{впр испр}}$, то форсунку можно считать исправной. Признаком достижения форсункой предельно допустимого состояния является превышение $\tau_{\text{впр изн}}$, соответствующее неисправной форсунке [143].

Таблица 4.1 – Сравнение расчётных и фактических результатов, не использовавшихся в обучающей выборке

Время впрыска, мс	Дымность ОГ, м ⁻¹		Отклонение, %
	Измеренное	Расчитанное ИНС	
3,58	0,76	0,84	10
3,89	0,87	0,79	8,9
3,69	0,77	0,82	6,2
3,7	0,77	0,82	5,9
3,44	0,79	0,88	10,1
3,26	0,92	0,96	4,4
2,25	3,16	3,19	0,9
2,20	3,34	3,312	0,9
2,45	2,50	2,57	2,6
Среднее отклонение		5,5	

4.3 Рекомендации по внедрению и оценка эффективности метода повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями

4.3.1 Метод повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями

На основании вышеизложенного, можно предложить последовательность шагов для реализации разработанного метода:

1. Проверка начальных условий (двигатель запущен, отсутствуют записанные в памяти ошибки, режим работы соответствует режиму проверки, значения диагностических параметров характеризующих техническое состояние других систем/узлов/агрегатов находятся в допустимом диапазоне)

2. Расчёт коэффициентов уравнений регрессии или обучение ИНС

4. Эксплуатация АТС, непрерывный контроль параметра $\tau_{\text{впр действ}}$ при проверке соблюдения условий из пункта 1.

5. При достижении $\tau_{\text{впр изн}}$ задействуется механизм информирования. Транспортное средство выводится из эксплуатации, до восстановления допустимых значений дымности.

Тогда алгоритм метода примет следующий вид (рис. 4.4).

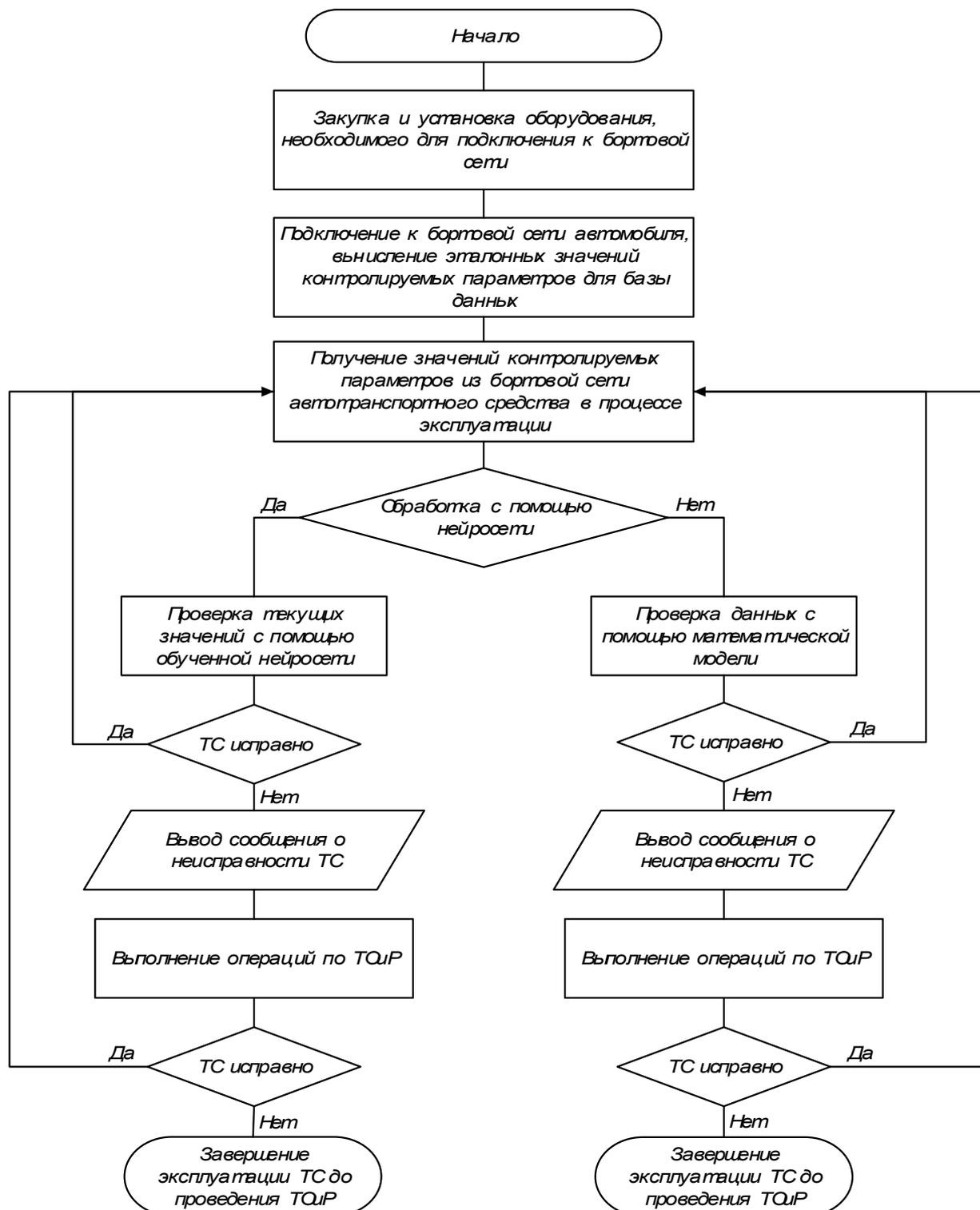


Рисунок 4.4 – Алгоритм метода повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями

Важно подчеркнуть, что описанная последовательность действий обладает высокой универсальностью и может быть успешно адаптирована для анализа других компонентов транспортных средств (ТС). Это открывает перспективы для дальнейших исследований и разработки алгоритмов, направленных на поддержание требуемого состояния как отдельных узлов ТС, так и транспортного средства в целом. Одним из ключевых преимуществ применения ИНС в разработанном методе является отсутствие необходимости в явном математическом обосновании взаимосвязей между параметрами. Метод позволяет работать с данными напрямую, минуя сложный этап формализации зависимостей. Тем не менее, как и любой другой инструмент, этот метод имеет свои ограничения.

Среди них можно выделить необходимость тщательного проектирования архитектуры искусственной нейронной сети (ИНС), обеспечение достаточных вычислительных мощностей для её работы, а также формирование качественных обучающих выборок, которые играют критически важную роль в успешности обучения модели [143].

4.3.2 Расчёт предотвращенного экологического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха

Предотвращённый с помощью применения разработанного метода экологический ущерб от загрязнения атмосферного воздуха может быть оценён по следующей формуле:

$$U = \gamma * \sigma * k * f * M, \quad (4.6)$$

где U – экономический ущерб от загрязнения ОС, руб.;

γ – удельный ущерб от загрязнения ОС, руб./т (на момент 1998 г. равна 48,4 руб./т, с учётом инфляции на 2025 год – 739,22 руб./т);

σ – поправка, которая учитывает территорию, на которую осуществляется воздействие (для Санкт-Петербурга $\sigma = 4$);

f – поправка, которая учитывает рассеивание примеси в атмосфере;

M – масса загрязняющих веществ, усл. Т. (масса выбрасываемого вещества и показатель его опасности);

k – коэффициент экономической и экологической опасности i -го загрязняющего вещества или группы веществ.

Приведённая масса годового выброса из источника, M , усл. т/год, рассчитывается по формуле:

$$M = \sum_{i=1}^n A_i m_i, \quad (4.7)$$

где A_i – показатель относительной агрессивности примеси ($A_i = 41,5$ для сажи);

m_i – значение фактической массы i -го вида загрязняющего вещества, т [182].

Фактическая масса сажи m_i может быть рассчитана с помощью оценки количества автомобилей с дизельными двигателями в Санкт-Петербурге и РФ в целом, пробеговых выбросов, которые для автомобилей экологического класса евро 4 составляют 0,025 г/км, для автомобилей евро 3 и ниже 0,06 г/км. Среднегодовой пробег, согласно данным Росстата, для легковых автомобилей составляет 17,5 тыс. км в год, для коммерческого транспорта 60 тыс. км в год. Таким образом экологический ущерб от выбросов сажи для парка транспортных средств с дизельными двигателями экологического класса 4 и ниже в РФ при условии их соответствия требованиям к выбросам загрязняющих веществ с отработавшими газами можно оценить, как:

$$У = 739,22 * 4 * 2,7 * 1 * 41,5 * 4994,716 = 1,027 \text{ млрд. руб.}$$

При реальной оценке технического состояния всего коммерческого транспорта экологического класса евро 4 и ниже с учётом возможности

длительной эксплуатации с превышением нормативов дымности и исходя из статистических данных о неисправностях ТА значение затрат достигает $У = 1,35$ млрд. руб. Таким образом потенциальное значение предотвращённого ущерба составляет достигает 323,4 млн. рублей. Следует отметить, что подобные расчёты целесообразно было бы провести и для автомобилей более высокого экологического класса, однако для этого необходимы статистические данные о наличии и исправности систем нейтрализации отработавших газов на таких автомобилях.

4.3.3 Экономическая оценка внедрения метода повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями

Для экономической оценки внедрения метода повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями, основанного на непрерывном контроле параметров, используемых электронным блоком управления двигателем для лица, осуществляющего эксплуатацию транспортных средств, необходимо учесть затраты, которые необходимы на реализацию проекта внедрения. Внедрение разработанного метода было осуществлено на базе АО «Автопарк №1 «Спецтранс» (организации, осуществляющей эксплуатацию парка из 400 АТС для перевозки твёрдых бытовых отходов). Затраты на внедрение разработанного метода в условиях АО «Автопарк №1 «Спецтранс» приведены в табл 4.2.

Экспериментальные исследования показали, что внедрение метода повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями, основанного на непрерывном контроле, используемых электронным блоком управления, в условиях АО «Автопарк №1 «Спецтранс» позволяет предотвратить не только эксплуатацию АТС с нарушением требований к дымности, но и повышение расхода топлива в связи с износом топливных форсунок. Обогащение смеси может происходить до достижения предельно возможных для воспламенения смеси значений коэффициента избытка воздуха, однако заметно

отразятся на мощности и расходе изменения значений коэффициента избытка воздуха в пределах 40-50%.

Таблица 4.2 – Затраты на внедрение метода повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями, основанного на непрерывном контроле параметров, используемых электронным блоком управления в условиях АО «Автопарк №1 «Спецтранс»

№ пп	Наименование затрат	Стоимость, млн руб
1	Расходы на закупку компонентов, необходимых для обработки собираемых данных (Контроллер Arduino mega, модуль дисплея, модули связи Bluetooth/Wi-Fi, корпус)	0,56
2	Расходы на закупку компонентов, необходимых для сбора данных (Диагностический интерфейс для подключения к системе бортовой самодиагностики автомобиля OBDII)	0,56
3	Расходы на разработку комплекса ПО	3
4	Расходы на монтаж системы	0,4
5	Прочие расходы	0,5
6	Итого	5,02

По данным предприятия на 2023 год в парке числится 164 автомобиля экологического класса не выше 4, коэффициент технической готовности 0,95, среднесуточный пробег на таких автомобилях составляет 50 км, расход топлива в среднем 16л/100км, актуальная на конец 2024 года стоимость дизельного топлива 71,79 руб., тогда среднесуточные расходы предприятия на топливо для указанных автомобилей составят:

$$164 \cdot 0,95 \cdot 16 \cdot 0,5 \cdot 71,79 = 89593,92 \text{ руб.}$$

Тогда в год затраты на топливо составят 32,7 млн. руб. при эксплуатации полностью исправных автотранспортных средств. Согласно данным АО «Автопарк №1 «Спецтранс» перерасход топлива, связанный с неисправностями топливных форсунок, за 2023 год составил 9 %, таким образом реальные затраты на топливо составили 35,64 млн. руб. Внедрение разработанного метода, а также

схожих методов, позволяющих определить другие неисправности топливной аппаратуры позволяет сократить затраты АО «Автопарк №1 «Спецтранс» на топливо на 2,95 млн. руб.

Выводы по четвёртой главе

В четвертой главе разработан комплекс решений по реализации метода повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями, основанного на непрерывном контроле параметров, используемых электронным блоком управления.

1. Предложен способ программно-аппаратной реализации метода повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями. Разработано ПО, реализующее получение и обработку данных для расчёта дымности в режиме реального времени. Уникальность ПО подтверждена полученным свидетельством о регистрации программы для ЭВМ (см. приложение В). Для получения полностью автономного устройства для работы программно-аппаратного комплекса потребуется автономное устройство способное взаимодействовать с адаптером ELM327. При автономном размещении на автомобиле всего устройства можно выбрать любой протокол взаимодействия между адаптером и контроллером, как проводной, так и беспроводной.

2. Для упрощения программной реализации, была рассмотрена возможность замены эмпирического определения коэффициентов в зависимости (2.26) на нейросетевую аппроксимацию. Разработан алгоритм обучения и применения искусственных нейронных сетей для непрерывного контроля дымности отработавших газов.

3. Разработан метод повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями, основанный на непрерывном контроле параметров, используемых электронным блоком управления, и предложены рекомендации по внедрению метода на предприятиях автомобильного транспорта. В отличие от существующих методов, предполагающих периодический контроль дымности с выводом АТС из эксплуатации, использование дорогостоящего диагностического оборудования и допускающих эксплуатацию транспортных средств с нарушением требований к дымности, разработанный метод позволяет осуществлять контроль дымности в режиме реального времени по косвенным признакам. В результате его

внедрения возможно значительное снижение трудоемкости и повышение оперативности контроля дымности отработавших газов, а также предупреждение длительной эксплуатации транспортных средств с превышением допустимых значений дымности.

4. Выполнен расчёт предотвращённого экологического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха отработавшими газами дизельного двигателя при внедрении метода повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями, основанного на непрерывном контроле параметров, используемых электронным блоком управления. Расчетная оценка показывает, что предотвращенный экологический ущерб составляет...

5. Выполненная экономическая оценка эффекта от внедрения метода повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями, основанного на непрерывном контроле параметров, используемых электронным блоком управления, в деятельность предприятия АО «Автопарк №1 «Спецтранс» свидетельствует о возможности сокращения затрат на топливо при эксплуатации 164 исследуемых автомобилей на 2,95 млн. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ структуры парка АТС в РФ и нормативной документации, а также существующих методов диагностирования элементов ТА дизелей (топливные форсунки), состояние которых оказывает влияние на состав отработавших газов, позволил утверждать, что существующие методы диагностирования ТА и средства их реализации не в полной мере обеспечивают соблюдение требований, предъявляемых к экологичности дизельных двигателей ТС, находящихся в эксплуатации. Также их можно охарактеризовать как недостаточно информативные и дорогостоящие. Сделанный вывод позволил обосновать актуальность проведения исследований в данном направлении и разработки метода повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями на основе непрерывного контроля параметров, используемых электронным блоком управления двигателем, устраняющего выявленные недостатки существующих методов диагностирования элементов ТА.

В рамках проведенного исследования были получены следующие результаты:

1. Обоснована возможность контроля дымности отработавших газов по параметрам, используемым электронным блоком управления.

2. Обосновано введение диагностического параметра, зависящего от износа сопловых отверстий распылителя форсунки и являющегося параметром рабочего процесса, используемым блоком управления. Таким параметром является длительность впрыска топлива.

3. Установлена зависимость дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от значений введенного диагностического параметра. Применение полученной зависимости за счет замены непосредственного периодического контроля дымности отработавших газов непрерывной расчетной оценкой по косвенным признакам позволяет снизить пробеговые выбросы сажи вплоть до 73,5%.

4. Разработан метод повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями на основе непрерывного контроля значений диагностического параметра – длительности впрыска – используемого электронным блоком управления двигателем.

5. Разработан программно-аппаратный комплекс для реализации метода повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями, реализующий получение и обработку данных от электронного блока управления двигателем для расчёта дымности в режиме реального времени. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025614893.

6. Выполнены расчёт потенциального размера предотвращённого экологического ущерба, который в масштабах Российской Федерации составляет до 323,4 млн. руб. Внедрение разработанного метода в работу автотранспортного предприятия АО «Автопарк № 1 «Спецтранс» позволило повысить экологическую безопасность подвижного состава на 6,56%, что подтверждается актом внедрения. Также для указанного предприятия произведена оценка экономии топлива от внедрения разработанного метода, являющейся следствием предупреждения эксплуатации неисправной топливной аппаратуры: при эксплуатации 164 грузовых автомобилей экологического класса 4 и ниже сокращение затрат на топливо составляет 2,95 млн руб.

Успешное выполнение перечисленных задач свидетельствует о том, что, сформирован новый научный подход, вносящий значительный вклад в решение обозначенной проблемы – обеспечения экологической безопасности, связанной с постоянным ростом автомобильного парка и достижением критического уровня негативного влияния АТ на окружающую среду.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проблемы экологической безопасности автомобильного транспорта Ладная Е.В., Бондарев З.З., Трофимов И.А. Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2017. № 3. С. 106-109.
2. Замков Г.Е., Маслов С.А., Рубайло В.Л. – Кислотные дожди и окружающая среда. –М., Химия,1991.144с.
3. Проблемы экологической обстановки на автомобильном транспорте в российской федерации Хегай Ю.А. Теория и практика общественного развития. 2014. № 2. С. 385-388.
4. Федеральная служба государственной статистики. URL: <http://www.gks.ru/> (дата обращения: 10.01.2024).
5. Зотов Л.Л. Экологическая безопасность автомобилей: учеб. пособие. СПб., 2005. 115 с.
6. Невмержицкий Н.В. Методика оценки и прогнозирования экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM10 и PM2.5: Автореф. ... дис. канд. тех. наук. – СПб., 2017. – 22 с.
7. Официальный сайт Госавтоинспекции. URL: <https://xn--90adear.xn--plai/> (дата обращения: 08.10.2024).
8. Воздействие автомобильного транспорта на окружающую среду и расчет концентраций вредных выбросов Тойлыбаев А.Е., Бекжанова Т.К., Кулотаев Ж.О. Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2017. № 4 (103). С. 122-129.
9. Технический регламент таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» 018/2011 URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_125114/fb912286b5c44149bb594585163dbf84f712edb5/ (дата обращения: 11.10.2024)
10. ГОСТ 33997-2016 «Колесные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации» URL:

https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_294563/ (дата обращения: 11.10.2024)

11. OBDII: Past, Present & Future. URL: http://www.autotap.com/techlibrary/obdii_past_present_future.asp (дата обращения: 11.07.2018).

12. OBD 3, OBM и перспективные требования URL: <https://ustroistvo-avtomobilya.ru/diagnostirovanie/obd-3-obm-i-perspektivnye-trebovaniya/> (дата обращения: 08.10.2019).

13. Современное оборудование для диагностики автомобильного транспорта Сабельников Б.Н., Козликин В.И. В сборнике: МОЛОДЕЖЬ И СИСТЕМНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ СТРАНЫ Сборник научных статей 2-й Международной научной Конференции студентов и молодых ученых. В 4-х томах. Ответственный редактор А.А. Горохов. 2017. С. 227-231.

14. Шароглазов Б. А., Фарафонов М. Ф., Клементьев В. В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов. Челябинск: ЮУрГУ, 2005. 403 с.

15. Ежов А. Вылетели в трубу: к чему приведет «дизельгейт» // За рулем. 2005. 29 сентября. URL: <https://www.zr.ru/content/articles/817339-vyleteli-v-trubu-kchemuprivedet-dizelgejt/> (дата обращения: 11.07.2018).

16. Nissan признался в фальсификации данных о выбросах выхлопных газов своих автомобилей. URL: <http://tass.ru/ekonomika/5357815> (дата обращения: 11.07.2018).

17. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ДОПУСКУ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ К ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОБЯЗАННОСТИ ДОЛЖНОСТНЫХ ЛИЦ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?from=341459-1961&req=doc&base=LAW&n=502052&rnd=2hhvqA#yat9AiUcZclmgsLY1> (дата обращения: 11.10.2024)

18. "Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях" от 30.12.2001 N 195-ФЗ (ред. от 01.04.2025)

http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34661/ (дата обращения: 15.01.2024)

19. Обзор систем впрыска топлива бензиновых двигателей внутреннего сгорания URL: <http://injector.fotocrimea.com/osvt1.html> (дата обращения: 11.10.2019)

20. Грехов Л. В., Иващенко Н. А., Марков В. А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: Учебник для вузов. — М.: Легион-Автодата, 2004. — 344 с. — 2500 экз. — ISBN 588850187-5.

21. Large Engine Injection Systems for Future. Christoph Kendlbacher, Peter Mueller, Martin Bernhaupt, Gerhard Rehbichler. Bergen : CIMAC, 2010. Full paper #50.

22. Показатели состояния безопасности дорожного движения <http://stat.gibdd.ru/> (дата обращения: 05.05.2024)

23. ГОСТ 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения URL: https://reliability.equipment/images/0/05/ГОСТ_P_27_102-2021_Надежность_в_технике_Надежность_объекта_Термины_и_определения.pdf (дата обращения: 05.05.2024)

24. ПЕРИОДИЧНОСТЬ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОБИЛЬНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ Бышов Н.В., Борычев С.Н., Кокорев Г.Д., Успенский И.А., Юхин И.А., Сеницин П.С., Карцев Е.А., Николотов И.Н., Гусаров С.Н. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 81. С. 390-400.

25. ГОСТ 25044-81 Техническая диагностика. Диагностирование автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных, строительных и дорожных машин.

26. Кузнецов Е.С. Исследование эксплуатационной надежности автомобиля. — М.: Транспорт, 1969.]

27. Марусин, А. В. Совершенствование диагностирования плунжерных пар топливного насоса высокого давления автотракторных дизелей : специальность

05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Марусин Александр Вячеславович. – Рязань, 2017. – 22 с.

28. Marusin, A.V. Fault Analysis and Diagnostic Device for Diesel Fuel Systems in Agricultural Machinery [Text] / A.V. Marusin, I.K. Danilov // Efficiency of Technical Operation and Auto-Service of Transport and Technological Machines: Collection of Scientific Articles from the III International Scientific Conference, Saratov, April 14, 2017. – Saratov: State Autonomous Institution of Additional Professional Education "Saratov Regional Institute of Education Development", 2017. – P. 57-61.

29. Lebedev, V.G., Ivanov, V.A. Analysis of Evaluation Indicators for the Technical Condition of Diesel Fuel Pump Plunger Pairs [Text] // Prospects for the Development of Technical Service in the Agro-Industrial Complex: Collection of Scientific Works. – Cheboksary: Chuvash State Agricultural Academy, 2014. – P. 89–90.

30. Design of Tractors and Automobiles: Textbook [Text] / Ed. by Prof. O.I. Polievayev. – St. Petersburg: Publishing House "Lan", 2013. – 288 p.

31. Dobrokhotov, Yu.N., Ivanshchikov, Yu.V., Valiev, A.R. et al. Improving the Accuracy of Fuel Pump Section Performance Regulation in Distributor-Type Fuel Pumps [Text] // Bulletin of the Kazan State Agrarian University. – 2019. – Vol. 14. No. 1 (52). – P. 77-82.

32. Gavrilov, V.N., Novikov, A.M., Semenov, A.V. et al. Minimizing Fuel Leaks in Worn Plunger Pairs by Shifting Wear Zones [Text] // Bulletin of the Kazan State Agrarian University. – 2019. – No. 4 (56). – P. 73-77.

33. Прогнозная оценка возможных значений давления впрыска топлива системы common rail / В. А. Иванов, А. В. Семенов, В. Н. Гаврилов [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 15. – № 2(58). – С. 92-95. – DOI 10.12737/2073-0462-2020-92-95.

34. Скибарко Д. С. Разработка алгоритмов микропроцессорного управления дизельным двигателем. Дис. канд. техн. наук. Н. Новгород, 2001.

35. Системы управления дизельными двигателями: Пер. с нем. М.: За рулем, 2004. 480 с.
36. Пинский Ф. И. Исследования дизельгенератора типа ЧН26/26 с электрогидравлической системой топливоподачи и электронным управлением /Ф. И. Пинский, Е. А. Никитин // Двигателестроение. 1979. № 10. С. 18-20.
37. Патент РФ Кл. F02M 51/00, 2006, "Система подачи топлива в цилиндры дизельного двигателя". RU 2 288 372 C2
38. Данковцев, В. Т. Перспективы применения аккумуляторных систем топливоподачи дизельных транспортных средств / В. Т. Данковцев, В. В. Лукьянченко // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2009. – № 3(13). – С. 5-12.
39. Kronberger M. Unit Injectors with Piezo Actuator for Euro 4 Diesel Engines. MTZ Worldwide, 2005, no. 5, pp. 8–11.
- 40 Worldwide Emission Standards Passenger Cars and Light Duty Vehicles 2012/2013. Delphi, 2012, 100 p.
- 41 Насос-форсунка с пьезоэлектрическим клапаном. Конструкция и принцип действия: Пособие по программе самообразования 352. ООО «Фольксваген ГрупРус», 2005, 24 с.
- 42 Двигатель 1,9 л TDI с системой впрыска топлива с насос-форсунками. Устройство и принцип действия: Пособие по программе самообразования 209. ООО «Фольксваген ГрупРус», 1998, 60 с.
- 43 Greeves G., Tullis S., Burker B. Advanced Two-Actuator EUI and Emission Reduction for Heavy-Duty Diesel Engines. SAE Technical Paper 2003-01- 0698, 20 p.
44. Система топливоподачи с насос-форсункой нового типа / Ю. Д. Погуляев, Р. М. Байтимеров, В. Н. Наумов, Д. А. Чижов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 10(22). – С. 52.
45. Грехов Л.В. - Аккумуляторные топливные системы двигателей внутреннего сгорания типа Common Rail. – Издательство МГТУ. – 2000. – 64 с.

46. Бышов Н.В. Повышение эффективности технической эксплуатации автомобилей / Н.В. Бышов, С.Н. Борычев, Г.Д. Кокорев, И.А. Успенский, Г.К. Рембалович, И.А. Юхин / Сельский механизатор. 2015. № 7. С. 38-39.

47. Дизельные аккумуляторные топливные системы Common rail: Учебное пособие. - М.: Легион-Автодата, 2009. – 44 с.

48. Жосан А.А. Головин С.И., Ревякин М.М. Лабораторный практикум по технической эксплуатации автомобилей . раздел диагностика/ А.А. Жосан. – Орел: Изд-во Орел ГАУ, 2015. – 272 с.

49. Жосан А.А. Головин С.И., Ревякин М.М. Лабораторный практикум по технической эксплуатации автомобилей . Раздел Техническое обслуживание/ А.А. Жосан. – Орел: Изд-во Орел ГАУ, 2015. – 272 с. 112

50. Жосан А.А., Головин С.И. Методы технической диагностики. Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Техническая диагностика».- Издательство ОрёлГАУ. – 2013.

51. Жосан А.А., Головин С.И., Рыжов Ю.Н. Электронные системы управления дизелями автомобилей. - Издательство ОрёлГАУ. – 2013.

52. Степанов, Д. В. Преимущества и недостатки дизельных двигателей с топливной системой common rail / Д. В. Степанов // Будущее науки - 2018 : Сборник научных статей 6-й Международной молодежной научной конференции. В 4-х томах, Курск, 25–26 апреля 2018 года / Ответственный редактор А.А. Горохов. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2018. – С. 277-280.

53. Диагностика и техническое обслуживание машин : учеб. / А.Д. Ананьин [и др.]. – М : Академия, 2015. – 416 с.

54. Неговора, А.В. Улучшение эксплуатационных показателей автотракторных дизелей совершенствованием конструкции и технологии диагностирования топливоподающей системы : дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.02 / А.В. Неговора. – СПб., 2004. – 343 л.

55. Грехов, Л.В. Аккумуляторная топливная система с электроуправляемой форсункой / Л.В. Грехов, И.И. Габитов, А.В. Неговора // Тракторы и сельхозмашины. – 2001. – № 7. – С. 14–16.

56. Неговора, А.В. Диагностирование топливной аппаратуры автотракторных дизелей / А.В. Неговора., Л.В. Грехов, И.И. Габитов // Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. 100-лет Вибе. – Челябинск : ЮУрГУ, 2003. – 85 с.

57. Кострицкий, В. В. Диагностирование дизельных топливных форсунок с пьезоэлектрическим приводом без снятия с двигателя / В. В. Кострицкий, А. В. Павченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2021. – № 3. – С. 49-54.

58. Исследование причин отказов топливной аппаратуры дизельных двигателей современных автомобилей / А. Ю. Малахов, Д. Е. Ивлиев, Т. Е. Лихачева [и др.] // Транспортные и транспортно-технологические системы : Материалы Международной научно-технической конференции, Тюмень, 14 апреля 2016 года / Ответственный редактор Н.С. Захаров. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2016. – С. 207-214.

59. Тышкевич, Л. Н. Совершенствование точности измерения диагностических параметров топливной аппаратуры системы "common rail" / Л. Н. Тышкевич, Б. В. Журавский // Успехи современной науки. – 2017. – Т. 5. – № 4. – С. 84-87.

60. Крайнов А.Н., Михалев Ю.В., Серегин А.А. Двигатели военной автомобильной техники. Учебное пособие. - СПб: ВАМТО, 2014. - 215 с.

61. Бурячко В.Р., Гук А.В. Автомобильные двигатели. Рабочие циклы, показатели и характеристики. Методы повышения эффективности энергопреобразования. - СПб: НПИКЦ, 2005. - 292 с. Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта. 2017. Вып. 2 28

62. Крайнов А.Н., Серегин А.А., Сысоев О.И., Андрющенко А.П. Диагностирование топливной аппаратуры дизелей методом эталонных моделей. -

М.: ЦВНИ МО РФ, сборник рефератов депонированных рукописей, серия Б, выпуск № 56, 2001.

63. Губертс Гюнтер Диагностирование дизельных двигателей. Серия «Автомеханик». Пер. с нем. Грудский Ю.Г. - М.: ЗАО «КЖИ «За рулём», 2004. - 121 с.

64. Методика комплексного диагностирования автомобильных дизелей с топливной аппаратурой типа "common rail" / А. Н. Крайнов, А. А. Серегин, Ю. В. Михалев, В. А. Хлюпин // Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта : материалы Международной очно-заочной научно-технической конференции, Тула, 23–24 ноября 2017 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2017. – С. 21-28.

65. Кострицкий, В. В. Диагностирование дизельных топливных форсунок с пьезоэлектрическим приводом без снятия с двигателя / В. В. Кострицкий, А. В. Павченко // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2021. – № 3. – С. 49-54.

66. Габитов, И. И. Разработка диагностического модуля для проверки аккумуляторных топливных систем типа common rail / И. И. Габитов, А. А. Козеев, Р. В. Ягодин // Международный научный журнал. – 2009. – № 2. – С. 81-83.

67. Нигматуллин, Ш. Ф. Диагностирование насоса топливной системы типа Common rail на основе параметрической идентификации колебаний давления в аккумуляторе / Ш. Ф. Нигматуллин, М. М. Габдрахимов, М. М. Валиев // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2011. – № 4. – С. 64-66.

68. Нигматуллин, Ф. Ш. Диагностирование аккумуляторных топливоподающих систем типа COMMON RAIL / Ф. Ш. Нигматуллин, М. М. Габдрахимов // Труды ГОСНИТИ. – 2009. – Т. 103. – С. 22-25.

69. Ильин, В. А. Определение допусковых значений структурных параметров для диагностирования электрогидроуправляемых форсунок COMMON RAIL / В. А. Ильин, А. А. Козеев // Научное обеспечение инновационного развития АПК : Материалы Всероссийской научно-практической

конференции в рамках XX юбилейной специализированной выставки "АгроКомплекс-2010", Уфа, 02–04 марта 2010 года / Редколлегия: Ф.З. Габдрафиков, Р.С. Аипов, Н.М. Губайдуллин. – Уфа: Башкирский государственный аграрный университет, 2010. – С. 74-77.

70. Нигматуллин, Ш. Ф. Методика диагностирования технического состояния топливоподающих систем типа COMMON RAIL / Ш. Ф. Нигматуллин, М. М. Габдрахимов // Научное обеспечение инновационного развития АПК : Материалы Всероссийской научно-практической конференции в рамках XX юбилейной специализированной выставки "АгроКомплекс-2010", Уфа, 02–04 марта 2010 года / Редколлегия: Ф.З. Габдрафиков, Р.С. Аипов, Н.М. Губайдуллин. – Уфа: Башкирский государственный аграрный университет, 2010. – С. 42-45.

71. Габитов, И. И. Совершенствование средств технического сервиса автотракторной и мобильной сельскохозяйственной техники / И. И. Габитов, А. В. Неговора // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 117. – С. 62-66.

72. Габитов, И. И. Передовые технологии технического обслуживания и ремонта топливной аппаратуры дизелей / И. И. Габитов, А. В. Неговора // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2015. – № 3(35). – С. 40-44.

73. Кривцов, С. Н. Динамический метод диагностирования автомобильных дизелей, оснащенных аккумуляторной топливоподающей системой / С. Н. Кривцов // Автомобильная промышленность. – 2015. – № 9. – С. 26-29.

74. Фомин ЮЛ., Никонов Г .В., Ивановский В.Г. Топливная аппаратура дизелей: Справочник. - М.: Машиностроение, 1982. - 168 с.

75. Одинцов, В. И. Некоторые закономерности образования сажи в цилиндрах судовых дизелей / В. И. Одинцов, Д. Ю. Глазков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2014. – № 3. – С. 83-88.

76. Odintsov, V.I. Working Process of Marine Internal Combustion Engines [Text] / V.I. Odintsov. – Kaliningrad: BSARF Publishing House, 2010. – 141 p.77. Борде, Н. Физическая 0D-модель дизельного сгорания с табличной химией и

предполагаемой функцией плотности вероятности для предварительного картографирования двигателя [Текст] / Н. Борде, К. Кайоль, П. Игелен. – Институт PRISME – Университет Орлеана, Франция, 2010.

78. Хмела, Ф. Прогнозирование турбулентно-контролируемого сгорания в дизельных двигателях [Текст] / Ф. Хмела, М. Энгельмайер, Г. Пиркер, А. Виммер // Конференция THIESEL 2004 по термо- и гидродинамическим процессам в дизельных двигателях. – 2004.

79. Хироясу, Х. Разработка и применение модели распылительного сгорания для прогнозирования эффективности и выбросов дизельных двигателей. Часть 1: Моделирование сгорания [Текст] / Х. Хироясу, Т. Кадота, М. Араи // Bull. JSME. – 1983. – Т. 26, № 214. – С. 569–575.

80. Мосс, Дж.Б. Моделирование образования и выгорания сажи в высокотемпературном ламинарном диффузионном пламени при обогащённом кислородом сгорании [Текст] / Дж.Б. Мосс, К.Д. Стюарт, К.Дж. Янг // Combustion and Flame. – 1995. – Т. 101. – С. 491–500.81. Глазков, Д. Ю. Процесс сажеобразования в цилиндре дизеля и методы его моделирования / Д. Ю. Глазков // Известия КГТУ. – 2018. – № 48. – С. 131-141.

82. Разлейцев, Н. Ф. Анализ и моделирование рабочего процесса ДВС / Н. Ф. Разлейцев. – Харьков: Вища школа, 1980. – 180 с.

83. Россохин, А. В. Расчет процессов образования сажевых частиц в цилиндре быстроходного дизеля с турбонаддувом / А. В. Россохин // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. – 2018. – № 20. – С. 537-540.

84. Срезневский Б.И. Об испарении жидкостей/ Б.И. Срезневский // ЖРФХО. - 1882. -Т. 14, Вып. 8. - С. 420-442.

85. Gafurov, R.A. Study of Diesel Fuel Spray Structure during Cyclic Injection Using Pulsed Holography [Text] / R.A. Gafurov, G.A. Glebov, Yu.M. Skvortsov // Engine Building. – 1996. – No. 3-4. – P. 10-12.

86. Lyushevsky, A.S. Fuel Atomization in Marine Diesel Engines [Text] / A.S. Lyushevsky. – Leningrad: Sudostroenie, 1971. – 248 p.

87. Alekseev, V.P. Physical Principles of Processes in Combustion Chambers of Piston Internal Combustion Engines: Study Guide for the Course "Theory of Working Processes in Combined ICEs" [Text] / V.P. Alekseev, D.N. Vyubov. – M.: BMSTU named after N.E. Bauman, 1977. – 84 p.

88. Kutovoy, V.A. Fuel Atomization by Diesel Injectors [Text] / V.A. Kutovoy. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 119 p.

89. Levin, V.G. Physical and Technical Hydrodynamics [Text] / V.G. Levin. – M.: Fizmatgiz, 1959. – 699 p.

90. Shalay, V.V. Calculation of Injection Parameters for Liquid Oxidizer Jets [Text] / V.V. Shalay, Yu.P. Makushev // Omsk Scientific Bulletin. – 2010. – No. 1 (87). – P. 66–71.

91. Polyakova, T.A. Calculation of Internal Combustion Engine Systems and Mechanisms Using Mathematical Methods: Study Guide [Text] / T.A. Polyakova, L.Yu. Mikhailova, A.V. Filatov; Ed. by Yu.P. Makushev. – Omsk: Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), 2011. – 284 p.

92. Карпущенко, Н. И. Регрессионный анализ процессов нарастания износа рельсов и вероятность их безотказной работы в кривых участках пути / Н. И. Карпущенко, Д. В. Величко, Е. С. Антерейкин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 28. – С. 6-15.

93. Масленников Д.А., Гайдарь О.Г Компьютерное моделирование процесса распыления топлива в бензиновых двс с непосредственным впрыском Масленников Д.А., Гайдарь О.Г. Современное машиностроение. Наука и образование. 2016. № 5. С. 848-856.

94. Гранкин М.Г., Калекин В.С. Теоретические исследования по кратковременному увеличению эффективной мощности дизельных двигателей обогащением воздушного заряда. В сборнике: Динамика развития системы военного образования Материалы II Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Под общей редакцией К.В. Костина. 2020. С. 34-42.

95. Сергеев С.С., Фролов С.М., Басара Б Численное моделирование сгорания и образования вредных веществ в цилиндре дизеля с применением

детального кинетического механизма окисления н-гептана. Горение и взрыв. 2017. Т. 10. № 2. С. 26-34.

96. Simcenter STAR-CCM+URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/simcenter/STAR-CCM.html> (дата обращения: 08.04.2021).

97. Алямовский, А. А. SolidWorks/COSMOS Works. Инженерный анализ методом конечных элементов : интегрир. среда моделирования и расчета : стат. расчет и параметр. оптимизация : связь с программами анализа кинематики и динамики : обзор интегрир. систем для инженер. расчетов : для Windows NT/2000/XP / А. А. Алямовский. – Москва : ДМК Пресс, 2004. – 431 с. – (Серия "Проектирование"). – ISBN 5940742181.

98. Лапин Ю. В., Стрелец М. Х. Внутренние течения газовых смесей. М. : Наука, 1989. 368 с.

99. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М. : Иностран. лит., 1961. 928 с.

100. Ферцигер Дж., Капер Г. Математическая теория процессов переноса в газах. М. : Мир, 1976. 555 с.

101. A semi-Lagrangian approximation in the NavierStokes equations for the gas flow around a wedge/ Shaydurov V., Liu T., Shchepanovskaya G., Yakubovich M. // AIP Conference Proceedings. 2015. Vol. 1684. P. 090011-1–090011-11.

102. Shaydurov V., Vyatkin A., Kuchunova E., SemiLagrangian difference approximations with different stability requirements // Russ. J. Numer. Anal. Math. Model. 2018. Vol. 33 (2). P. 123–135.

103. Якубович, М. В. Моделирование течения многокомпонентной газовой смеси с помощью комбинации полулагранжевого метода и метода конечных элементов / М. В. Якубович // Решетневские чтения. – 2018. – Т. 1. – С. 594-595.

104. Осциллограф для начинающих URL: <https://docplayer.ru/33664259-Oscillograf-dlya-nachinayushchih.html> (дата обращения: 11.10.2020)

105. Казарцев, В.И. Ремонт машин (тракторов, автомобилей, сельскохозяйственных машин) [Текст] / В.И. Казарцев. – М.: Госсельхозиздат, 1999. – 696 с.
106. Popov, A.S. Problems and Technical Solutions for Using High-Performance Agricultural Transport Equipment / A.S. Popov, I.A. Yukhin, I.A. Uspensky, V.A. Ksendzov, A.A. Simdyankin, G.D. Kokorev, A.M. Kravchenko, A.V. Shemyakin, M.B. Uglanov / Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. 2015. No. 114. P. 949-974.
107. Belov, P.M. Engines of Army Vehicles. Part 1 [Text] / P.M. Belov, V.R. Buryachko, E.I. Akatov. – М.: Voenizdat, 1992. – 512 p.
108. Buryachko, V.R. Power Units and Electrical Systems of Military Automotive Equipment [Text] / V.R. Buryachko. – L.: VOLATT, 1998. – 440 p.
109. Karunin, A.L. Improving the Efficiency of Multi-Purpose Automotive Equipment Using Alternative Fuels: Dr. tech. sci. diss. abstract [Text] / A.L. Karunin. – М.: NATI, 1999.
110. Assessment of Combat Readiness of Ground Forces Weaponry and Military Equipment Based on the Chechen Conflict Experience and Proposals for Eliminating Identified Shortcomings: Report of the NTSC of the Ground Forces [Text]. – М., 1996. – 175 p.
111. Bobkov, Yu.K. Technical Diagnostics of Internal Combustion Engines Based on Working Process Parameters [Text] / Yu.K. Bobkov, Yu.M. Gorsky, M.A. Chernyshev. – М.: GOSNITI, 1983. – 172 p.
112. Vasilyev, Yu.A. Rationale and Development of Effective Diagnostic Systems for Agricultural Mobile Machinery: Dr. tech. sci. diss. [Text]: defended 16.03.1994: approved 19.10.1994 / Yu.A. Vasilyev. – Chelyabinsk, 1994. – 388 p.
113. Military-Technical-Economic Evaluation of Automotive Power Units: Methodological Manual [Text]. – Ryazan: RVVDSU, 2013. – 115 p.
114. Gabitov, I.I. Maintenance and Diagnostics of Fuel Systems for Automotive and Tractor Diesel Engines [Text] / I.I. Gabitov, L.V. Grekhov, A.V. Negovora. – М.: Legion-Avtopodata, 2009. – 248 p.

115. Nikolaenko, A.V. Diagnostics, Efficiency, Economy, and Durability Improvement of Engines [Text] / A.V. Nikolaenko. – L.: Kolos, 1982. – 257 p.
116. Nikolaenko, A.V. Comprehensive Impact of Fuel System Adjustment Parameters on Tractor Diesel Performance [Text] / A.V. Nikolaenko // Engine Building. – 1990. – No. 4. – P. 28-30.
117. Chmela F., Jager P., Herzog P., Wiebeleit F. // Emission Improvement in Direct-Injection Diesel Engines through Injection Profile Shaping, MTZ 60, 552–558, 1999.
118. Gergenov, S.M. Fuel Systems of Automotive Engines. Part 1. Diagnostics of Diesel Fuel Systems Using Non-Engine Test Methods: Methodological Guidelines for Laboratory Work [Text] / S.M. Gergenov. – Ulan-Ude, 2001.
119. Kokorev, G.D. Enhancing the Efficiency of Agricultural Vehicle Maintenance Systems Using Engineering Cybernetics: Dr. tech. sci. diss.: 05.20.03/G.D. Kokorev. – Ryazan, 2014. – 483 p.
120. Golubev, I.G. Reduction of Agricultural Machinery Fleet and Service Challenges / I.G. Golubev, A.P. Korolkova / Proceedings of GOSNITI. 2015. Vol. 121. P. 76-79.
121. Tastanbekov, T.Kh. Diagnostics of Automotive Diesel Fuel Systems Based on Fuel Pressure in the Injection Line: Cand. tech. sci. diss. abstract [Text] / T.Kh. Tastanbekov. – M., 1984. – 19 p.
122. Shapran, V.N. Evaluation Criteria for Fuel Supply Systems [Text] / V.N. Shapran, A.N. Patrin. // Abstracts of the 25th Scientific-Methodological Conference of the Military Automotive Institute. – Ryazan, 1995.
123. Брызик, У. Взаимосвязь между выбросами дыма и рабочими параметрами двигателя [Текст] / У. Брызик, К. Смит // SAE Preprint, 1987, № 770718. – С. 14–23.
124. Belyatsev, A.V. Fuel Systems of Automotive and Tractor Diesels [Text] / A.V. Belyatsev, A.S. Protsarov. – M.: Rosagropromizdat, 1998. – 223 p.

125. Buravlev, Yu.V. Design, Maintenance, and Repair of Automotive Fuel Systems [Text] / Yu.V. Buravlev, O.A. Martinov, E.V. Plennikov. – M.: Vysshaya Shkola, 1997. – 263 p.
126. Karpenco, A.N. Modern Diesel Fuel Injection Systems: Analysis and Prospects [Text] / A.N. Karpenco, V.V. Sidorov. – M.: Mashinostroenie, 2010. – 312 p.
127. Krutov, V.I. Fuel Systems of Automotive and Tractor Engines [Text] / V.I. Krutov, V.E. Gorbanevsky, V.G. Kislov. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 208 p.
128. Popov, A.S. Problems and Technical Solutions for Using High-Performance Agricultural Transport Equipment / A.S. Popov, I.A. Yukhin, I.A. Uspensky, V.A. Ksendzov, A.A. Simdyankin, G.D. Kokorev, A.M. Kravchenko, A.V. Shemyakin, M.B. Uglanov / Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. 2015. No. 114. P. 949-974.
129. Система впрыскивания фирмы BOSCH для дизелей [Текст] / Роберт Бош. ГмбХ. Производственный отдел № 5. – Штутгарт, 1988. – 143 с.
130. Брэди, Р.Н. Топливные системы дизельных двигателей [Текст] / Р.Н. Брэди. – Preston Publishing Incorporated, 1991. – 564 с.
131. MTZ Extra 03.2008. 150 лет Рудольфу Дизелю [Текст]. – 80 с.
132. Граевский, И. С. Метод непрерывного контроля состояния воздушного фильтра автомобильного двигателя внутреннего сгорания / И. С. Граевский // Транспортное дело России. – 2024. – № 3. – С. 195-198. – EDN SHEAXA.
133. Khachyan, A.S. Accumulator Fuel System with Electro-Hydraulic Pump-Injectors of a New Generation [Text] / A.S. Khachyan, S.N. Alekseev, A.B. Alekseev // Perspectives of Piston Engine Development in the 21st Century: Coll. of Scientific Works of MSTU (STU). – M., 2002. – P. 73-86.
134. Pinskiy, F.I. Microprocessor Control Systems for Automotive Internal Combustion Engines [Text] / F.I. Pinskiy, R.I. Davtyan, B.Ya. Chernyak. – M.: Legion-Avtopodata, 2001. – 136 p.
135. Доле, У. Четвертое поколение системы впрыска Common Rail для дизельных двигателей в соответствии с будущими экологическими нормами [Текст] / У. Доле, М. Дурнгольц, С. Кампманн, Й. Хаммер, К. Хинриксен //

Доклад на Международном автомобильном конгрессе FISITA (F2004V217). – Барселона, 2004.

136. Гриуэс, Г. Причины выбросов углеводородов дизельными двигателями [Текст] / Г. Гриуэс, И. Хан, Ц. Ван, И. Фенне // SAE Preprint. – 1987. – № 770259. – С. 1–12.

137. Перспективное поколение систем впрыска Common Rail для крупногабаритных двигателей от L'ORANGE GMBH. Проектирование, применение, характеристики и выбросы современных систем ДВС [Текст] / Р. Йорах, Х. Рессель, В. Шайбе, Р. Прилвиц, Л. Бакай // Двигатели внутреннего сгорания (ICE). – 2002. – Т. 39. – ASME. – С. 17–27.

138. Byshov, N.V. Methods for Determining Rational Frequency of Monitoring the Technical Condition of the Braking System of Agricultural Machinery [Text] / N.V. Byshov, S.N. Borychev, I.A. Uspensky, G.D. Kokorev, I.N. Nikolotov, S.N. Gusarov, E.A. Pankova // Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University (KubSAU Scientific Journal) [Electronic Resource]. – Krasnodar: KubSAU, 2013. – No. 02(086). – P. 585–596. – IDA [article ID]: 0861302041. – Access mode: <http://ej.kubagro.ru/2013/02/pdf/41.pdf>

139. Veynblat, M.Kh. Reducing Smoke Emissions of a Forced Diesel Engine at Idle Speeds [Text] / M.Kh. Veynblat, P.A. Fedyakin // Engine Building. – 1990. – No. 11. – P. 8-11.

140. Golverk, O.A. Operational Reliability Study of Tractor Fuel Systems [Text] / O.A. Golverk, V.D. Boyko // Mechanization and Electrification of Agriculture: Republican Interdepartmental Thematic Scientific-Technical Collection. – 1991. – Issue 15. – P. 55-60.

141. Methods for Determining Economic Efficiency of Using Research Results, New Equipment, Inventions, and Rationalization Proposals in Agriculture [Text]: – М.: All-Union Academy of Agricultural Sciences (VASKHNIL), 1980. – 116 p.

142. ОСТ 37.01.234–81. Охрана природы. Атмосфера. Дизели автомобильные. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы измерений [Текст]. – Введ. 1981 г. – М.: Изд-во стандартов, 1981.

143. Граевский, И. С. Обоснование возможности непрерывного контроля дымности отработавших газов автомобилей с дизельным двигателем экологического класса не выше третьего / И. С. Граевский // Транспортное дело России. – 2024. – № 3. – С. 181-185. – EDN LDVYJJ.

144. Reducing Exhaust Gas Toxicity and Developing Special Devices in Vehicle Design to Ensure Complete Fuel Combustion: Research Report (Final) [Text] / RVVDKU. – Ryazan, 2011. – 168 p.

145. Garret, K. Reducing Diesel Exhaust Gas Odor [Text] / K. Garret // Automotive Engineer. – 1987. – No. 3. – P. 41-42.

146. Bel'skikh, V.I. Handbook on Maintenance and Diagnostics of Tractors [Text] / V.I. Bel'skikh. – M.: Rosselkhozizdat, 1996. – 400 p.

147. ГОСТ 14228-80. Дизели и газовые двигатели автоматизированные URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006926?ysclid=m9kcxtgk31195857359> (дата обращения 12.08.2019)

148. Zabrodsky, V.M. Improving Tractor Reliability [Text] / V.M. Zabrodsky, G.E. Topilin, S.G. Stopalov. – Kyiv: Urozhai, 1995. – 272 p.

149. Karunin, A.L. Improving the Efficiency of Multi-Purpose Automotive Equipment Using Alternative Fuels: Dr. tech. sci. diss. abstract [Text] / A.L. Karunin. – M.: NATI, 1999.

150. Топливный насос высокого давления ремонт URL: <http://diesel73.ru/tnvd.html> (дата обращения 12.08.2019)

151. Двигатели cummins причины неисправностей и ремонт URL: <http://dvigatel-cummins.ru/remont/prichiny-neispravnostej-i-remont-tnvd-marki-cummins.html> / (дата обращения 12.08.2019).

152. Системы common rail ремонт и обслуживание URL: <http://www.extrim-bog.ru/index.php?name=pages&op=view&id=313> (дата обращения 12.08.2019).

153. Системы common rail ремонт и обслуживание URL: <http://www.remkam.ru/red60-5> (дата обращения 12.08.2019).

153 Топливный насос высокого давления ремонт URL: <http://www.tnvd62.ru/remont-tnvd.php> / (дата обращения 12.08.2019).

154. Kudrin, A.I. On the Issue of Diagnostics of Diesel Fuel Systems [Text] / A.I. Kudrin // Proceedings of the Chelyabinsk Polytechnic Institute. – Chelyabinsk, 1974. – Vol. 106. – P. 51-57.

155. Kuznetsov, A.S. Maintenance and Diagnostics of Internal Combustion Engines [Text] / A.S. Kuznetsov. – М.: Akademiya, 2013. – 80 p.

156. Kutovoy, V.A. Fuel Injection in Diesel Engines [Text] / V.A. Kutovoy. – М.: Mashinostroenie, 1981. – 246 p.

157. Fuel Equipment Repair [Electronic resource] // TNVD62.RU. – URL: www.tnvd62.ru/remont-tnvd.php (accessed: 12.08.2019). 157. Топливный насос высокого давления ремонт URL: <http://dizel54.ru/remont/remont-tnvd.html> (дата обращения 27.04.2020).

158. Топливный насос и форсунки – устранение неисправностей URL: <http://www.edial.ru/articles/diesel-injection-pump-troubleshooting.html> (дата обращения 27.04.2020).

159. Неисправности топливных форсунок, нагнетательных трубопроводов и их причины URL: http://www.filavto-engels.ru/Neispravnosti_forsunok,_nagnetatelnyh_toplivoprovodov_i_ih_prichiny.htm (дата обращения 27.04.2020).

160. Топливный насос высокого давления ремонт URL: http://www.vsdi.ru/neispravnosti_tnvd_i_pri (дата обращения 27.04.2020).

161. Марков, В.А. Характеристики топливоподачи транспортных дизелей [Текст] / В.А. Марков, В.Г. Кислов, В.А. Хватов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 162 с.

162. Свиридов, Ю.Б. Топливо и топливоподача автомобильных дизелей [Текст] / Ю.Б. Свиридов – Л.: Машиностроение, 1979. – С. 248.

163. Файнлейб, Б.Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей. Справочник [Текст] / Б.Н. Файнлейб. – М.: Машиностроение, 1990.

164. Топливный насос высокого давления ремонт URL: <http://dizel54.ru/remont/remont-tnvd.html> (дата обращения 27.04.2020).

166. Marusin, A.V. Mathematical Model of Processes in the Plunger Pair of a Diesel High-Pressure Fuel Pump [Text] / A.V. Marusin, A.M. Sychev, I.K. Danilov // Bulletin of Saratov State Technical University. – 2013. – Issue 2. – No. 2 (71). – P. 53-56.
167. Morozov, Yu.V. Linear Regression Equations for Fuel Injection Parameters in Diesel Engines [Text] / Yu.V. Morozov // Engine Building. – 1988. – No. 2. – P. 11-14.
168. Perepelkin, A.P. Calculation of the Fuel Injection Process with Cavitation in the High-Pressure Fuel Line [Text] / A.P. Perepelkin, V.I. Alekseev // Engine Building. – 1987. – No. 7. – P. 26-38.
169. Башта, Т.М. Машиностроительная гидравлика [Текст] / Т.М. Башта. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.
170. Venikov, V.A. Theory of Similarity and Modeling [Text] / V.A. Venikov, G.V. Venikov. – 3rd ed. – М.: Vysshaya Shkola, 1984. – 439 p.
171. Golubev, I.G. Testing Diesel Fuel Injector Nozzles on Blended Fuel [Text] / I.G. Golubev, N.I. Rudenko // Scientific and Technical Progress in Agricultural Production. – 2010. – P. 221-224.
172. Levin, M.I. Theoretical and Experimental Study of a Diesel Engine as an Object of Automation: Dr. tech. sci. diss. abstract [Text] / M.I. Levin. – Spec. 05.04.02 – Thermal Engines. – L.: LKI, 1969. – 47 p.
173. Lysenko, A.A. Study of Static and Dynamic Characteristics of Diesel Engine Control Systems with Various Types of Regulators: Research Report [Text] / A.A. Lysenko, P.A. Vatin, A.M. Sychev. – State Reg. No. 81090103. – 1987. – 132 p.
174. Development of a Stand with an Analog Computer for Studying Dynamic Parameters of Indirect-Acting Speed Regulators: Research Report [Text] / E.M. Kofman, A.A. Lysenko, A.M. Sychev et al. – State Reg. No. 286007034. – Info Card 20.12.85.
175. Uspensky, I.A. Application of Stochastic Processes for Determining the Technical Condition of Agricultural Vehicles during Diagnostics [Text] / I.A. Uspensky, G.D. Kokorev, S.N. Gusarov // Current Issues in Vehicle Operation:

Proceedings of the XVI International Scientific-Practical Conference. – 2014. – P. 121-125.

176. Шалашов И.В. Байесовские методы принятия решений при управлении техническим обслуживанием по фактическому состоянию. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. // НГТУ: Н. Новгород. – 2011. – 147 с.

177 Корчагин В.А. Организация подсистемы предремонтного диагностирования агрегатов автомобилей при их централизованном ремонте по техническому состоянию. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. // ТюмГНГУ: Тюмень. – 2014. – 149 с.

178 Воробьев С.А. Методика оценки влияния условий эксплуатации на техническую готовность автотранспортных средств. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. // СПбГАСУ: Санкт-Петербург. – 2013. – 172 с.

179. Igor Chernyaev, Sergei Korabelnikov, Igor Grayevskiy The mechanism of continuous monitoring of compliance with environmental requirements imposed on vehicles in operation. Thirteenth International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities (SPbOTSIC 2018) Transportation Research Procedia 36 (2018) 108–113

180. Dong, Dawei W. Neural Networks for Engine Fault Diagnostics [Текст] / Dawei W. Dong, John J. Hopfield, K.P. Unnikrishnan. – Pasadena, CA 91125, Computation and Neural Systems California Institute of Technology, 1997. – P. 635 – 644.

181. Katsuba Yurii, Grigorieva Liudmila. Application of Artificial Neural Networks in Vehicles' Design Self-Diagnostic Systems for Safety Reasons. Transportation Research Procedia, Volume 20, 2017, Pages 283-287

182. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба" (утв. Госкомэкологией РФ 09.03.1999)

183. Свиридов, А.В. Улучшение эксплуатационных характеристик дизелей ВАТ: дис. ... канд. техн. наук [Текст]: защищена 28.05.1998: утв. 26.11.1998 / А.В. Свиридов. – Рязань: РВАИ, 1998. – 196 с.
184. Барсуков, С.И. Топливоподающие системы дизелей с электронным управлением. Ч. 1 [Текст] / С.И. Барсуков, В.П. Муравьев, В.В. Бухвалов. – Омск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1976. – 142 с.
185. Фомин В.А. Транспорт и экология: Учебное пособие для студентов транспортных специальностей / В.А. Фомин. - М.: Издательство "Высшая школа", 2015. - 256 с.
186. Марусин, А. В. Совершенствование диагностирования плунжерных пар топливного насоса высокого давления автотракторных дизелей : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Марусин Александр Вячеславович. – Рязань, 2017. – 22 с.
187. ГОСТ Р 52033-2003. Автомобили с бензиновыми двигателями ВЫБРОСЫ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200031639> (дата обращения 10.10.2023)
188. International Energy Agency. Fuel Consumption Reduction Strategies: 2022 Report. Paris: OECD Publishing, 2022.
189. Bosch. Automated Driving: Benefits and Challenges. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 2021.
190. SAE Technical Paper Series. Tire Wear Particles in Urban Environments. Warrendale: SAE International, 2018.
191. World Health Organization. Health Impacts of Non-Exhaust Emissions. Geneva: WHO Press, 2021.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Документы, подтверждающие практическую значимость исследования

УТВЕРЖДЕНО

Главный инженер ООО «АГС»

Н. А. Землянкин

21 октября 2024 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Граевского Игоря Станиславовича

**«МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ДИЗЕЛЬНЫМИ
ДВИГАТЕЛЯМИ»**

Комиссия ООО «АГС» в составе главного инженера Землянкина Н.А., инженера ПТО Матвеева А. рассмотрела вопрос об использовании результатов диссертационной работы Граевского Игоря Станиславовича и установила следующее. Результаты диссертационного исследования внедрены в техническую стратегию развития компании, данный материал используется для формирования технических заданий и формирования финансовых моделей.



Главный инженер
инженер



Приложение А

Документы, подтверждающие практическую значимость исследования

УТВЕРЖДЕНО

Заместитель главного инженера
АО «Автопарк №1 «Спецтранс»
А. А. Кондратюк
23 октября 2024 г.

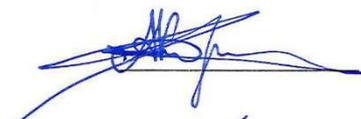
АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Граевского Игоря Станиславовича

**«МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ДИЗЕЛЬНЫМИ
ДВИГАТЕЛЯМИ»**

Комиссия АО «Автопарк №1 «Спецтранс» в составе заместителя главного инженера Кондратюка А.А., инженера Никифорова О.А. рассмотрела вопрос об использовании результатов диссертационной работы Граевского Игоря Станиславовича и установила следующее. Результаты диссертационного исследования внедрены в техническую стратегию развития компании. Внедрение разработанного метода привело к снижению финансовых издержек на топливо, а также снижению антропогенного воздействия на окружающую среду спецавтомобилей, выраженного в повышении экологической безопасности подвижного состава на 6,56 % в среднегодовом эквиваленте.


Зам. главного инженера


инженер



Документы, подтверждающие практическую значимость исследования



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

№ _____

[Акт внедрения материалов диссертации]
 в учебный процесс СПбГАСУ



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

материалов, содержащихся в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук «Метод повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями» Граевского Игоря Станиславовича, в учебный процесс Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета

Комиссия в составе:

Председателя: кандидата технических наук, доцента Зазыкина А.В. – декана автомобильно-дорожного факультета.

Членов комиссии:

доктора технических наук, доцента Куракиной Е.В. – заведующего кафедрой наземных транспортно-технологических машин;

кандидата технических наук, доцента Черняева И.О. – заведующего кафедрой технической эксплуатации транспортных средств;

доктора технических наук, профессора Евтюкова С.С. – заведующего кафедры транспортных систем и дорожно-мостового строительства.

Настоящим подтверждает внедрение материалов, содержащихся в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук «Метод повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями» Граевского Игоря Станиславовича (научный руководитель: заведующий кафедрой кафедры технической эксплуатации транспортных средств кандидат технических наук, доцент Черняев И.О.), в

Документы, подтверждающие практическую значимость исследования

учебный процесс кафедр технической эксплуатации транспортных средств и наземных транспортно-технологических машин автомобильно-дорожного факультета для обучающихся по направлениям подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 23.03.01 «Технология транспортных процессов», 2.9.5 «Эксплуатация автомобильного транспорта» и по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»,

Результаты диссертации Граевского Игоря Станиславовича нашли теоретическое и практическое применение в учебном процессе по следующим дисциплинам:

23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов»:

- Б.В.17 «Диагностика современных электронных систем управления автотранспортных средств и их компонентами»;

- Б1.В.07 «Основы работоспособности технических систем и диагностика»;

- Б1.В.02 «Силовые агрегаты»;

23.03.01 «Технология транспортных процессов»:

- Б1.О.25 «Техническая эксплуатация транспортных средств»;

23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»:

- Б1.О.31 «Диагностика, инструментальный контроль и экспертиза наземных транспортно-технологических машин»

2.9.5 «Эксплуатация автомобильного транспорта»:

- 2.1.01.03 Эксплуатация автомобильного транспорта.

Внедрение результатов диссертации Граевского Игоря Станиславовича обсуждено на заседании учебно-методической комиссии автомобильно-дорожного факультета Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета «06» февраля 2025 г., протокол № 3.

Основные положения диссертации «Метод повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями» для совершенствования технологий диагностирования, инструментального контроля и обеспечения экологической безопасности силовых агрегатов транспортных средств при их эксплуатации изложены в следующих печатных трудах автора:

1. Chernyaev, I. The mechanism of continuous monitoring of compliance with environmental requirements imposed on vehicles in operation / I. Chernyaev, I. Grayevskiy, S. Korabelnikov // Transportation Research Procedia, Saint Petersburg, 27–29 сентября 2018 года. Vol. 36. – Saint Petersburg: Elsevier B.V., 2018. – P. 108-113. – DOI 10.1016/j.trpro.2018.12.051. – EDN WUSYKD.

2. Grayevskiy, I. CDF simulation-based research of influence of mechanical defects in nozzles on environmental parameters of automotive diesel engines / I. Grayevskiy, A. Marusin

Документы, подтверждающие практическую значимость исследования

// Transportation Research Procedia : 14, Saint Petersburg, 21–24 октября 2020 года. – Saint Petersburg, 2020. – P. 182-191. – DOI 10.1016/j.trpro.2020.10.023. – EDN UIURJB.

3. Граевский, И. С. Обоснование возможности непрерывного контроля дымности отработавших газов автомобилей с дизельным двигателем экологического класса не выше третьего / И. С. Граевский // Транспортное дело России. – 2024. – № 3. – С. 181-185. – EDN LDVYJJ.

4. Граевский, И. С. Метод непрерывного контроля состояния воздушного фильтра автомобильного двигателя внутреннего сгорания / И. С. Граевский // Транспортное дело России. – 2024. – № 3. – С. 195-198. – EDN SHEAXA.

5. Граевский, И. С. Исследование влияния состояния элементов системы питания дизельного двигателя на состав отработавших газов / И. С. Граевский // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – № 4. – С. 17-21. – DOI 10.36535/0236-1914-2020-04-4. – EDN TXLLES.

6. Граевский, И. С. Механизм непрерывного контроля соблюдения экологических требований, предъявляемых к транспортным средствам в эксплуатации / И. С. Граевский, И. О. Черняев // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 6(71). – С. 180-184. – DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-6-180-184. – EDN VSNQMU.

7. Граевский, И. С. Использование современных методов анализа информации для решения задач технической эксплуатации автотранспортных средств / И. О. Черняев, И. С. Граевский, И. И. Воронцов // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 1(72). – С. 194-199. – DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-1-194-199. – EDN HINNOT.

Председатель комиссии:
Декан АДФ, к.т.н., доцент

 Зазыкин А.В.

Члены комиссии:
Заведующий кафедрой НТТМ,
д.т.н., доцент

 Куракина Е.В.

Заведующий кафедрой ТЭТС,
к.т.н., доцент

 Черняев И.О.

Заведующий кафедрой ТСиДМС
д.т.н., профессор

 Евтюков С.С.

Свидетельство о поверке средства измерений

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ	
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ "ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ И ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ" (ФБУ "ТЕСТ-С.-ПЕТЕРБУРГ") наименование аккредитованного в соответствии с законодательством Российской Федерации об аккредитации в национальной системе аккредитации юридического лица или индивидуального предпринимателя, выполняющего поверку	
Уникальный номер записи об аккредитации в реестре аккредитованных лиц RA.RU.311483	
СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ № С-СП/13-10-2021/102246993	
Действительно до 12.10.2022	
Средство измерений	Дыномеры: ИНФРАКАР Д; ИНФРАКАР Д исп. ИНФРАКАР Д1-3; Рег. № 27801-04 <small>наименование и обозначение типа, модификация (при наличии) средства измерений, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений, присвоенный при утверждении типа</small>
заводской номер	973 <small>заводской (серийный) номер или буквенно-цифровое обозначение</small>
в составе	-
поверено	по каналу определения плотности в отработавших газах <small>наименование единиц величин, диапазонов измерений, на которых поверено средство измерений или которые исключены из поверки</small>
в соответствии с	ВЕКМ.415311.007 ПЛ <small>наименование или обозначение документа, на основании которого выполнена поверка</small>
с применением эталонов:	21280-01 Комплекты нейтральные светофильтров КФ-01 11 2006 Рабочий эталон для средств измерений спектральных интегральных и редуцированных коэффициентов направленного пропускания и оптической плотности <small>регистрационные номера эталонов и (или) наименования и обозначения типов стандартных образцов и (или) средств измерений, заводские номера, обязательные требования к эталонам</small>
при следующих значениях влияющих факторов:	температура: 22,4 градус С; атм. давление: 101,1 кПа; отн. влажность: 54,3 % <small>перечень влияющих факторов, при которых проводилась поверка, с указанием их значений</small>
и на основании результатов поверки,	периодической поверки признано пригодным к применению в объеме проведенной поверки.
Постоянный адрес записи сведений о результатах поверки в ФИФ ОЕИ:	https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/results/1-102246993
Номер записи сведений о результатах поверки в ФИФ ОЕИ:	102246993
Поверитель	Михалёв Сергей Валентинович <small>фамилия, инициалы</small>
Знак поверки:	
Начальник отдела 436 <small>должность руководителя или другого уполномоченного лица</small>	 <small>подпись</small>
Дата поверки	13.10.2021 <small>фамилия, инициалы</small>
<small>Выписка о результатах поверки СИ ИС-СП/13-10-2021/102246993 сформирована автоматически 18.10.2021 08:47 по данным, содержащимся в ФИФ ОЕИ</small>	

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025614893

**Программа расчета дымности отработавших газов по
параметрам электронного блока управления
«Дымомер»**

Правообладатель: *Граевский Игорь Станиславович (RU)*

Автор(ы): *Граевский Игорь Станиславович (RU)*

Заявка № **2025613005**
Дата поступления **17 февраля 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **26 февраля 2025 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*



документ подписан электронной подписью
Сертификат 0692e7e3a65006764264c650bca2026
Владимир Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 2013.04.04 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов