

На правах рукописи



Граевский Игорь Станиславович

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

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Черняев Игорь Олегович

Официальные оппоненты: **Ложкина Ольга Владимировна**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Санкт-Петербургский университет
Государственной противопожарной службы
Министерства Российской Федерации по делам
гражданской обороны, чрезвычайным
ситуациям и ликвидации последствий
стихийных бедствий имени Героя Российской
Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева»,
кафедра физико-химических основ процессов
горения и тушения, профессор;

Хакимов Рамиль Тагирович
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Санкт-Петербургский государственный
аграрный университет», кафедра
«Автомобили, тракторы и технический сервис»,
заведующий;

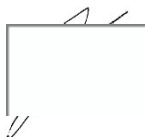
Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-
дорожный государственный технический
университет».**

Защита состоится «30» сентября 2025 года в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.2.380.05 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» СПбГАСУ по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на официальном сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialty/personal/graevskiy-igor-stanislavovich>

Автореферат разослан «09» июня 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совет



Грушецкий Станислав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

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.

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, ос-

нованного 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., Бoryчев 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., Трусков 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 Heywood J.B. (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 транспортных 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, 13–14.11.2018 г.; 13-ой (27–29.09.2018 г.), 14-ой (21–24.10.2020 г.), 15-ой (26–29.10.2022 г.), 16-ой (25-28.09.2024 г.) 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.

Во введении обоснованы актуальность, определены цель и задачи исследования, объект, предмет, методы исследования, научная новизна и практическая значимость, а также приведены сведения о публикациях и структуре диссертации.

В первой главе проанализирована структура парка автотранспортных средств в Российской Федерации. Проанализирована работа их систем бортовой самодиагностики и показано, что они не могут полностью предупредить эксплуатацию транспортных средств с нарушением требований к выбросам загрязняющих веществ с отработавшими газами. Также проанализирована действующая нормативная документация, регламентирующая контроль отработавших газов в эксплуатации, показаны ее недостатки. Сделан вывод о целесообразности повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями.

Во второй главе обоснованы структурные параметры, характеризующие износ топливных форсунок и влияние этих параметров на дымность отработавших газов дизельного двигателя. Также обоснован диагностический параметр, используемый электронным блоком управления, характеризующий износ сопловых отверстий распылителя топливных форсунок. Разработан комплекс математических моделей для расчёта дымности отработавших газов на основе параметров, используемых электронным блоком управления двигателем.

В третьей главе представлены результаты эксперимента, определяющие связь между дымностью отработавших газов и значениями параметров, которые используются блоком управления дизельного двигателя. Эксперимент включал: анализ процесса впрыскивания и распыливания топлива форсунками системы Common Rail на базе CFD-модели; микроскопию сопловых отверстий форсунок двигателя Isuzu 4HJ1; сбор и обработку экспериментальных данных для уточнения математической модели зависимости дымности отработавших газов от длительности впрыска топливных форсунок.

В четвертой главе разработан метод повышения экологической безопасности АТС с дизельными двигателями на основе параметров, используемых электронным блоком управления. Выполнен расчёт потенциального размера предотвращённого экологического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха, обеспечиваемого применением разработанного метода, и проведена оценка экономической эффективности метода.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Состав отработавших газов является результатом сложных физико-химических процессов, для правильного протекания которых электронному блоку управления двигателем необходимо рассчитывать ряд быстроизменяющихся параметров.

Одним из основных признаков нарушения указанных процессов является повышенный расход топлива, что подтверждается результатами исследований, согласно которым перерасход топлива на автотранспортных предприятиях из-за неисправностей топливной аппаратуры может составлять до 40%. Это приводит к соответствующему увеличению выбросов с отработавшими газами. На рисунке 1 представлена данные о причинах повышения дымности у ТС дизельными двигателями.



Рисунок 1 – Статистика причин повышения дымности у дизельных автомобилей с системой Common Rail (в процентах), основанная на анализе данных сервисных центров, технических исследований и экспертных оценок

Проведён системный анализ факторов обеспечения экологической безопасности транспортных средств (ЭБТС). Их декомпозиция приведена на рисунке 2. Выявлено, что для оценки уровня экологической безопасности транспортного средства наиболее целесообразным с точки зрения технической эксплуатации АТС в современных условиях является использование групп параметров Y и D , формирующих целевую функцию:

$$k = f(y_1, y_2, \dots, y_n; d_1, d_2, \dots, d_n). \quad (1)$$

В связи с этим новый метод повышения экологической безопасности, заменяющий периодический контроль дымности, должен основываться на анализе значений диагностического параметра, получаемого из системы бортовой самодиагностики.

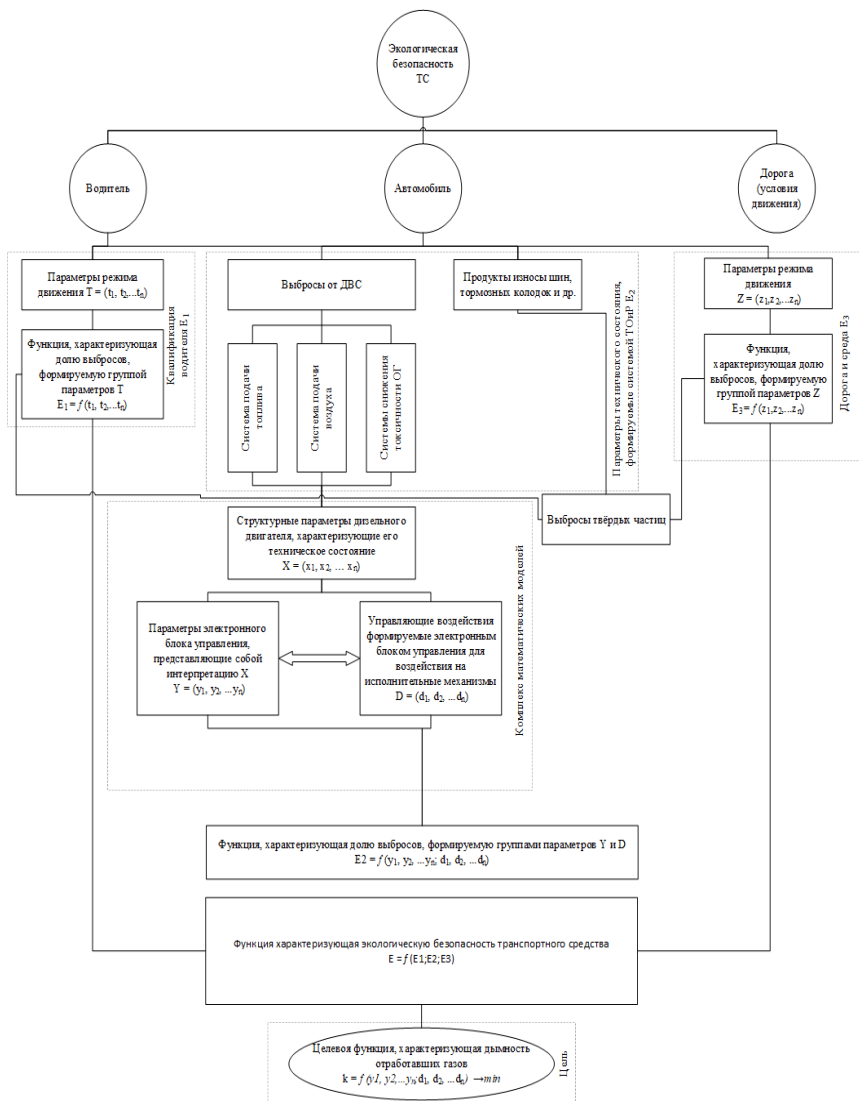


Рисунок 2 – Декомпозиция факторов, определяющих ЭБТС

Закономерность истечения топлива из открытой форсунки описывается уравнением:

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

где $p_{\text{рампл}}$ – 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).

Количество поданного топлива связано с износом форсунки через эффективное проходное сечение $[\mu_{\text{с}} \cdot f_{\text{с}}]$. Для обеспечения учета износа форсунки предложена следующая зависимость:

$$\mu_{\text{с}} = a_{i0} + a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + a_{i4}x_4 + a_{i5}x_5 + a_{i6}x_6, \quad (3)$$

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.

Уравнения (2) и (3) подтверждают взаимосвязь между параметром подачи топлива (объемным расходом) и параметрами, характеризующими износ сопла топливной форсунки (площадь и диаметр сопла).

Полнота сгорания топлива в камере сгорания определяется качеством распыла топлива, т.е. возможностью доступа к молекулам топлива свободного кислорода. Качество распыла оценивается средним диаметром капель, рассчитываемым по формуле:

$$d_z = d_{\text{с}} \cdot b_1 \cdot \left(\frac{P_{\text{в}}}{\rho_{\text{т}}} \cdot We \right)^{b_2} \cdot L_p^{b_3} \quad (4)$$

где $d_{\text{с}}$ – диаметр сопла, $b_1 \dots b_3$ – эмпирические коэффициенты, We и L_p – числа Веббера и Лапласа.

Уравнение (4) подтверждает взаимосвязь между качеством распыла топлива (средним диаметром капель) и параметром, характеризующим износ сопла топливной форсунки (площадь сопла).

Электронный блок управления двигателем обеспечивает требуемое значение цикловой подачи топлива через изменение длительности импульсов на открытие форсунок (длительность впрыска $\tau_{\text{впр}}$), реагируя на изменение $\mu_{\text{с}} \cdot f_{\text{с}}$, $p_{\text{рампл}}$, $p_{\text{цил}}$ и др., то есть:

$$Q_{\text{ц}} = f(\tau_{\text{впр}}) \quad (5)$$

С учетом этого, используя уравнения (2-4) и учитывая, что $Q_{\text{ц}} = Q_{\text{ф}} \cdot \tau_{\text{впр}}$, длительность впрыска описывается с помощью следующего

выражения (справедливого как для механических, так и для электрогидравлических топливных форсунок системы Common Rail):

$$\tau_{\text{впр}} = \left((a_{i0} + a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + a_{i4}x_4 + a_{i5}x_5 + a_{i6}x_6) \cdot \frac{n \cdot \pi}{4} \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{d_z}{b_1 \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_m} \cdot We \right)^{b_2} \cdot L_p^{b_3}} \right)^2 \sqrt{2 \cdot \frac{|(p_{\text{рамп}} - p_{\text{цил}})|}{\rho_t}} \right) / Q_{\text{ц}} \quad (6)$$

Уравнение (6) подтверждает зависимость длительности впрыска от параметров, характеризующих износ топливной форсунки (площадь и диаметр сопла).

Основными факторами, влияющими на количество сажи, содержащейся в выхлопных газах, являются масса или объем фактически попавшего в цилиндр топлива (характеризуется цикловой подачей), средний диаметр капель, а также ряд других факторов, таких как скорость потока воздуха и его количество, и др. Тогда, с учетом уравнения (6), концентрация сажи описывается функцией:

$$PM = f \left(\tau_{\text{впр}}, p_{\text{абс}}, p_{\text{рамп}}, N_{\text{обор}}, EGR_{\text{rate}}, \frac{dN}{dt}, T_{\text{вп}} \right), \quad (7)$$

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

$$PM = k_0 \cdot t_{\text{впр}}^{a_1} \cdot N_{\text{обор}}^{a_2} \cdot p_{\text{абс}}^{a_3} \cdot p_{\text{рамп}}^{a_4} \cdot EGR_{\text{rate}}^{a_5} \cdot e^{a_6 \cdot T_{\text{вп}}} \cdot \left(1 - \frac{dN}{dt} \right)^{a_7} + b_0, \quad (8)$$

где $p_{\text{абс}}$ – значение абсолютного давления во впускном коллекторе (Н/м^2), $N_{\text{обор}}$ – 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 , $a_1 \dots a_7$ – регрессионные коэффициенты.

Измерение дымности в соответствии с действующими стандартами проводится в режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя, в котором некоторые параметры из уравнения (8) можно считать константами. Также необходимо преобразовать концентрацию сажи в дымность, для чего необходимо ввести базовый коэффициент пересчёта, тогда:

$$k = k_{\text{п}} \cdot \left(k_0 \cdot t_{\text{впр}}^{a_1} + b_0 \right), \quad (9)$$

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

Длительность впрыска является параметром, используемым электронным блоком управления и доступным для контроля с помощью системы бортовой самодиагностики (см. уравнение 1). Таким образом обосновано, что длительность впрыска можно использовать в качестве диагностического параметра, зависящего от износа сопла топливной форсунки (см. уравнение 6), применение которого позволяет предотвратить превышение допустимых значений дымности отработавших газов.

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

Для создания численной модели процесса впрыска использовался программный комплекс Simcenter STAR-CCM+. Примеры результатов моделирования¹ представлены на рисунке 4.

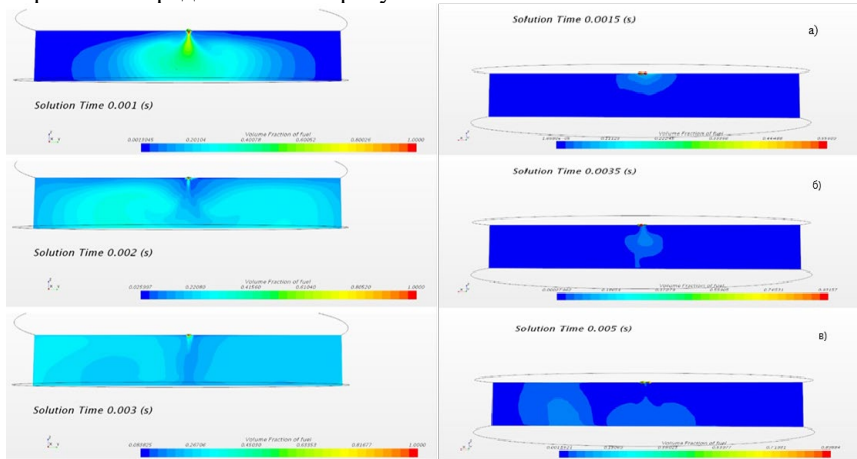


Рисунок 4 – Распределение концентрации топлива по объёму камеры сгорания (в плоскости продольного сечения, проходящей через распылитель) при исправном (слева) и неисправном (справа) распылителе, давление впрыска минимальное а) начало распыливания топлива; б) завершение распыливания топлива; в) распределение топлива по объёму камеры сгорания после окончания впрыска

Таким образом подтверждено существенное влияние параметра $\mu_c \cdot f_c$ 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 топлива в режиме свободного ускорения коленча-

¹ Результаты моделирования получены в 2020 году.

того вала двигателя. При увеличении 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 на 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 2...9%.

Для оценки состояния элементов форсунок применялась микроскопия с разной кратностью увеличения 50...1000. Для этого использовались форсунки, эксплуатировавшиеся на двигателе 4Н11 на протяжении 30...80 тыс. км пробега. Пример обнаруженных дефектов исследуемых распылителей представлен на рисунке 5, места повреждений отмечены цифрами. Увеличение площади сечения соплового отверстия в результате повреждений составило $\approx 15\%$.

После оценки состояния форсунки устанавливались в двигатель для анализа взаимосвязи параметров, используемых электронным блоком управления и дымности ОГ. Массив полученных значений составил более 1000 записей, из них более 40 соответствуют замерам дымности в режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя. Была определена матрица парных корреляций на основе коэффициентов корреляции Пирсона между основными параметрами, входящими в формулу (8). Результаты расчётов парных корреляций представлены в таблице 2.

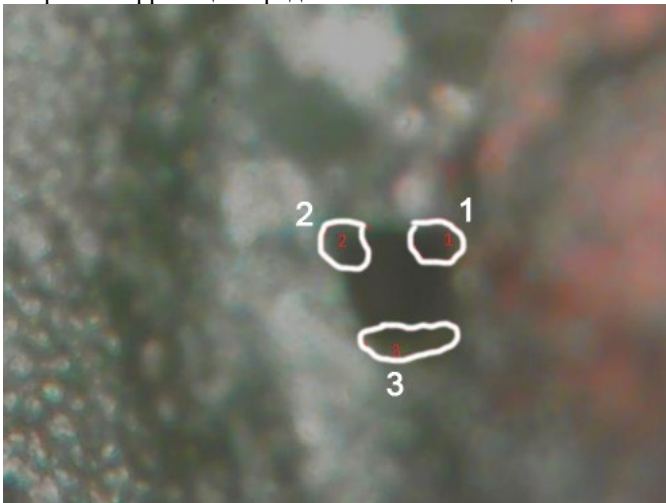


Рисунок 5 – Сопловое отверстие со следами износа, распылитель №1;
1-3 – дефекты соплового отверстия.

Таблица 2 – Матрица парных корреляций

	Дымность, k	Длительность впрыска, $t_{\text{впр}}$	Давление топлива в рампе, P_T	Давление воздуха во впускном коллекторе, P_v	Обороты двигателя, $N_{\text{обор}}$	Температура воздуха на впуске - $T_{\text{вп}}$	Открытие клапана EGR, EGR_{rate}
k	1						
$t_{\text{впр}}$	-0,93	1					
P_T	0,089	-0,05	1				
P_v	0,049	-0,02	0,18	1			
$N_{\text{обор}}$	0,079	-0,10	-0,13	-0,21	1		
$T_{\text{вп}}$	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 ($r = -0,93$), взаимное влияние других параметров 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 6 диаграмма размещения.

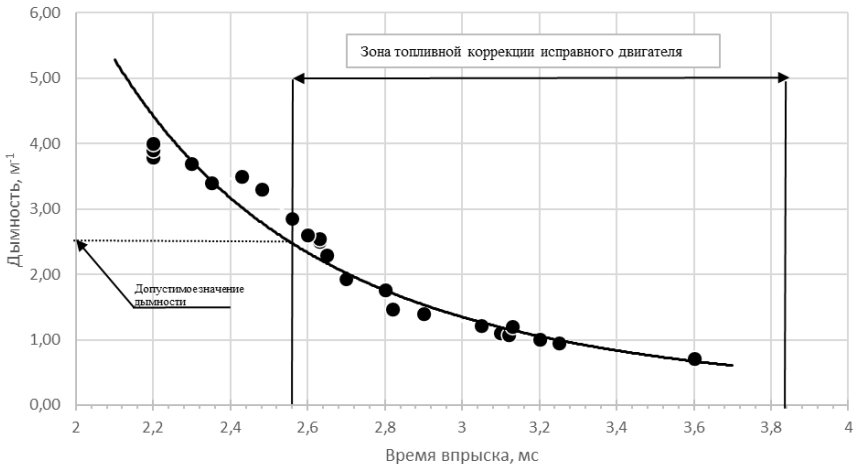


Рисунок 6 – Зависимость дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от длительности впрыска топлива

Для математического описания представленной на рисунке (6) зависимости получено уравнение (10):

$$k = 90,76,077 \tau_{\text{впр}}^{-3,831}, \quad (10)$$

Минимальное значение $\tau_{\text{впр}}$ для исследуемого блока управления составляет 2,2 мс, дальнейшее сокращение длительности впрыска топлива невозможно. Значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,94$ говорит об адекватности полученной модели. Полученные коэффициенты применимы для двигателя Isuzu 4НJ1, который был исследован. 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.

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 %.

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

Для обеспечения возможности практической реализации контроля дымности отработавших газов с использованием обоснованной зависимости дымности от длительности впрыска разработано программное обеспечение. Алгоритм его работы представлен на рисунке 7. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025614893.

Для возможного упрощения реализации, была рассмотрена возможность замены эмпирического определения коэффициентов в зависимости (10) на нейросетевую аппроксимацию. Была спроектирована и обучена ИНС вида 1-2-1; алгоритм обучения ИНС – метод обратного распространения ошибки.

Результаты сопоставления измеренной дымности и расчётов, выполненных ИНС, представлены в таблице 3.

По данным таблицы видно, что ИНС рассчитывает значение дымности ОГ с высокой точностью, не располагая математически формализованными зависимостями.

Таблица 3 – Сравнение расчётных и фактических результатов, не использовавшихся в обучающей выборке

Длительность впрыска, мс	Дымность ОГ, м ⁻¹		Отклонение, %
	Измеренное	Рассчитанное 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	

Обоснованная зависимость дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя от длительности впрыска топлива и изложенные разработки по ее практическому применению могут быть положены в основу нового метода повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями. Он заключается в непрерывном контроле диагностического параметра – длительности впрыска – используемого электронным блоком управления двигателем, и оценке на этой основе значений дымности отработавших газов.

При выявлении превышения допустимых значений дымности, лицу, осуществляющему эксплуатацию техники, выдается предупреждение о необходимости приостановки эксплуатации до устранения причин превышения дымности. Последовательность шагов для реализации разработанного метода представлена на рис. 8.

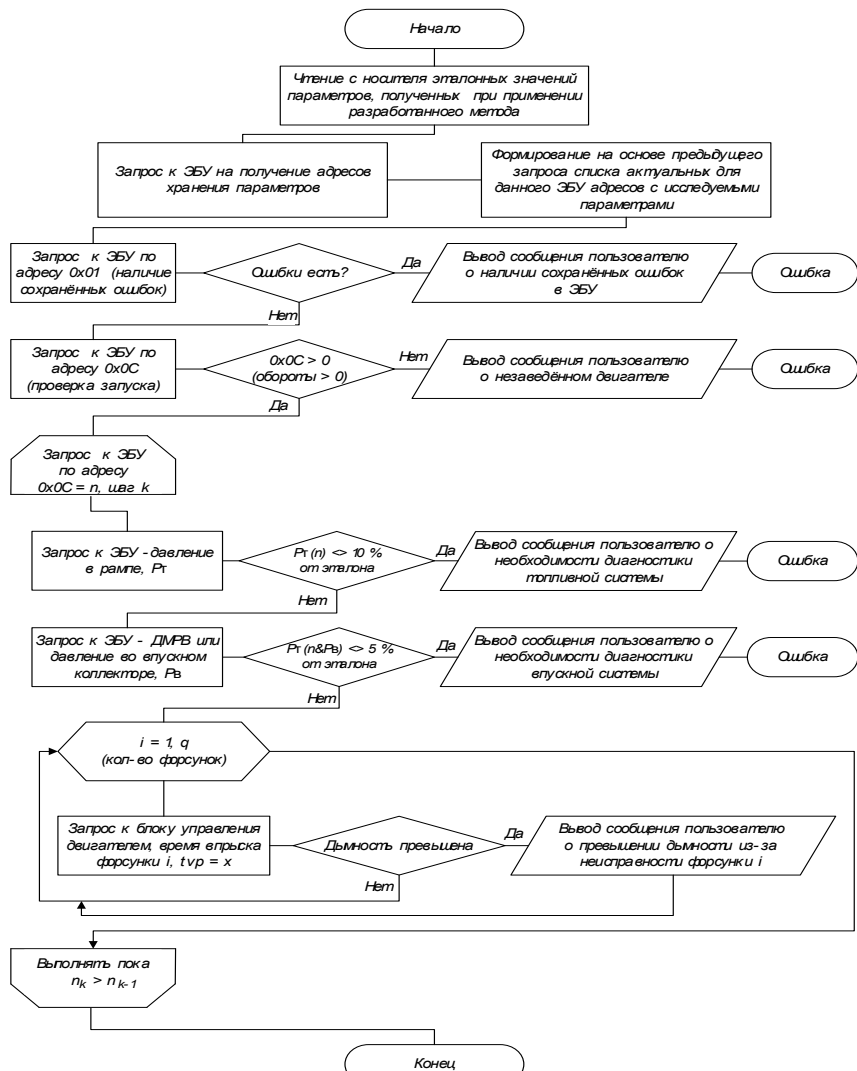


Рис. 7 – Алгоритм работы ПО

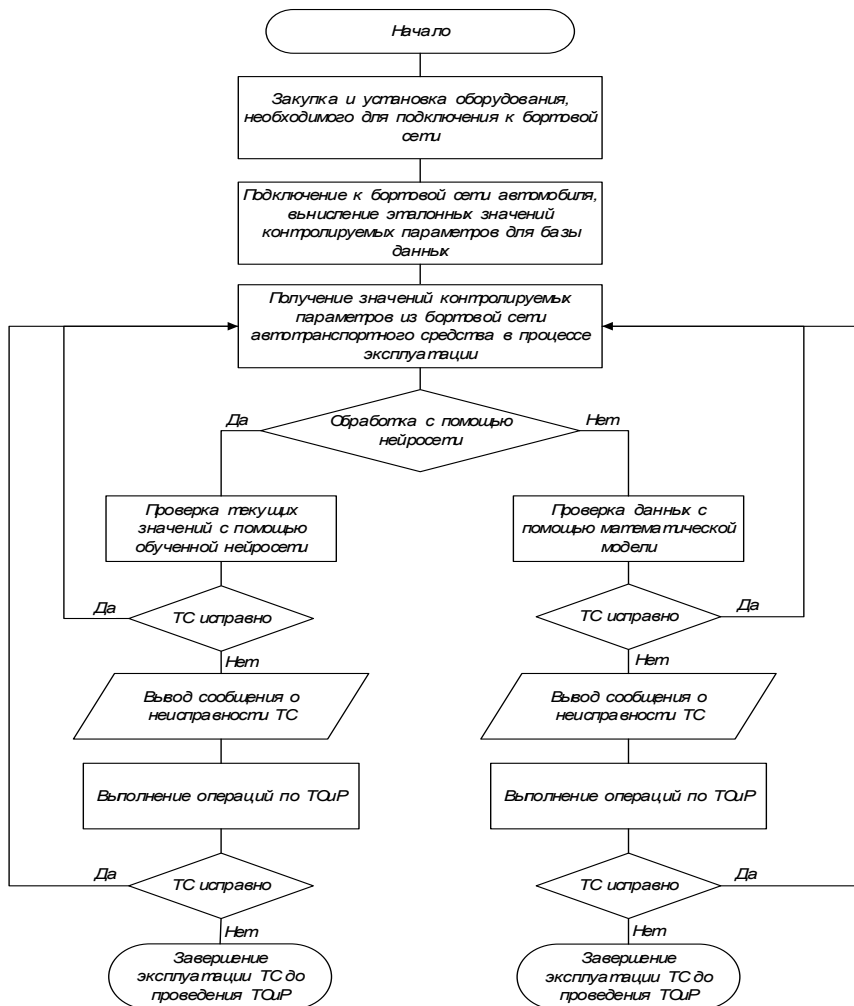


Рисунок 8 – Алгоритм повышения экологической безопасности автотранспортных средств с дизельными двигателями

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

$$Y = \gamma \cdot \sigma \cdot k \cdot f \cdot M, \quad (13)$$

где Y – экономический ущерб, руб.; γ – удельный ущерб, руб./т (в 2025 г. равна 739,22 руб./т); σ – поправка на территорию; f – коэффициент рассеивания примеси в атмосфере; M – масса загрязняющих веществ, усл. т.; k – коэффициент экономической и экологической опасности i -го загрязняющего вещества.

Масса годового выброса из источника, M , усл. т/год, рассчитывается по следующей формуле:

$$M = \sum_{i=1}^n A_i m_i, \quad (14)$$

где A_i – относительная агрессивность примеси ($A_i = 41,5$ для сажи); m_i – фактическая масса i -го вида загрязняющего вещества, т.

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:

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

При реальной оценке технического состояния всего коммерческого транспорта экологического класса евро 4 и ниже с учётом статистических данных о неисправностях ТА потенциальное значение предотвращённого ущерба достигает 323,4 млн. рублей.

Внедрение разработанного метода было осуществлено на базе АО «Автопарк №1 «Спецтранс». Затраты на внедрение разработанного метода в условиях АО «Автопарк №1 «Спецтранс» приведены в табл. 4. Среднесуточные расходы предприятия на топливо для исследуемых автомобилей составляют 89 593,92 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 %, реальные затраты на топливо составили 35,64 млн. руб. Внедрение разработанного метода позволяет сократить затраты АО «Автопарк №1 «Спецтранс» на топливо на 2,95 млн. руб.

Таблица 4 – Затраты на внедрение разработанного метода в условиях АО «Автопарк №1 «Спецтранс»

№ пп	Наименование затрат	Стоимость, млн руб
1	Расходы на закупку компонентов, необходимых для обработки собираемых данных	0,56
2	Расходы на закупку компонентов, необходимых для сбора данных	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

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 РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в ведущих научных рецензируемых изданиях, перечень которых размещён на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии:

1. 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. (0,31 п.л.)

2. 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. (0,25 п. л.)

3. 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. (0,31 п. л.)

4. 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. (0,32 п. л.)

5. 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, (0,38 п. л.).

Работы, опубликованные в издании, индексируемом международными системами цитирования Scopus:

6. 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, (0,38 п.л.).

7. Grayevskiy, I. CDF simulation-based research of influence of mechanical defects in nozzles on environmental parameters of automotive diesel engines / I. Grayevskiy, A. Marusin // 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, (0,56 п.л.).

Работы, опубликованные в других изданиях:

8. Граевский, И. С. Об актуальности задач «цифровой экономики» в сфере технической эксплуатации транспортных средств / И. С. Граевский, И. О. Черняев // Транспорт России: проблемы и перспективы - 2018 : Материалы международной-научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13–14 ноября 2018 года. Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2018. – С. 31–36. – EDN FBZCZJ. (0,38 п.л.)

9. Граевский, И. С. Исследование возможности мониторинга экологичности автомобильных ДВС по параметрам их электронного блока управления / И. С. Граевский // Актуальные проблемы безопасности дорожного движения : Материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 04–06 апреля

2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. – С. 125-131. – EDN TCOSVL, (0,44 п.л.).

Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ:

10. Программа расчета дымности отработавших газов по параметрам электронного блока управления. Свидетельство № 2025614893, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 26.02.2025 г.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 21.05.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 56.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А