

На правах рукописи



Абызов Илья Тимурович

**МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ СПЕЦИАЛЬНЫХ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ,
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ
МЕГАПОЛИСА**

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Евтюков Сергей Аркадьевич.

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 «Санкт-Петербургский горный университет».**

Защита состоится «15» июня 2023 года в 11:00 часов 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/specialtys/personal/abyzov-ilya-timurovich>.

Автореферат разослан «4» мая 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Е. В. Куракина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из основных технологических тенденций развития автомобильного транспорта является снижение токсичности выбросов отработавших газов при повышении эксплуатационной экономичности автомобилей. Решение первой задачи является наиболее актуальной для крупных городских агломераций Российской Федерации, в частности для агломерации г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области (мегаполиса). На долю удельного веса вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу автомобилями в крупных городах, приходится более 80%. Поэтому снижение токсичности выбросов автомобильного транспорта в крупных городских агломерациях позволит улучшить значительно снизить загрязнение воздушного бассейна. Решение второй задачи – повышение эксплуатационной экономичности автомобилей позволит сократить транспортные расходы, которые влияют на себестоимость услуг. Обязательной и постоянно функционирующей составляющей в структуре подвижного состава крупных агломераций является большое количество эксплуатируемого специального транспорта.

Ключевыми методами, позволяющими управлять количеством вредных выбросов в атмосферу при сохранении или повышении эксплуатационных характеристик автомобилей, являются конструкционный и эксплуатационных методы. Конструкционные методы используются на стадии проектирования специального автотранспорта. При этом, изначально принимаются такие конструктивные характеристики ДВС, которые отвечают уже существующим определенным нормам экологической безопасности при определенных режимах эксплуатации. Но ужесточение экологических требований и норм происходит постоянно и их изменения регулярны в течении одного срока службы подвижного состава. Кроме того, активно развиваются технологии, направленные на снижение токсичности выбросов вредных веществ в атмосферу, и их внедрение возможно в процессе организации работ по ТО и ТР автомобилей.

Поэтому, в настоящее время, увеличивается значимость эксплуатационного метода, применение которого позволяет качественно изменять характеристики подвижного состава в процессе его эксплуатации. Сегодня, система ТО и ТР специального автотранспорта, предполагает не только возможность поддержки их технического состояния в соответствии с заданными уровнями экологических нормативов безопасности на основе постоянного ведения технического контроля технических и экологических параметров, но и проведения высококачественного обслуживания с целью улучшения характеристик ДВС специального автотранспорта

В данном исследовании разрабатывается комплекс мероприятий при организации работ по ТО и ТР, позволяющих применять присадки водорода в ДВС, работающих по циклу дизеля на примере двигателей Tector 4 и Tector 6, что в конечном итоге приводит к повышению топливной

экономичности, эффективного КПД, снижению дымности и токсичности отработавших газов.

Результатом исследования является методика повышения экологической безопасности специальных транспортных средств, эксплуатируемых в условиях мегаполиса.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиям по экологической безопасности автотранспорта с дизельными ДВС в условиях городской агломерации посвящены труды отечественных и иностранных авторов: А. М. Данилова, В. П. Шкалова, В.Н. Ложкина, Н. Н. Патрахальцева, О.В. Ложкиной, А. Lowi, М. Masood, Т. А. Tsujimura, Е. Musk и другие. В работах многих авторов определяется одним из возможных способов разрешения приведенной проблемы - подача малых примесей водорода в дизельное топливо в магистраль высокого давления во время образования низкого давления с помощью специального устройства. Применение вышеприведенного решения позволяет не вносить существенных изменений в конструкцию ДВС или топливной аппаратуры и обеспечить достаточно высокий уровень качества регулирования и безопасности при использовании примесей водорода.

Однако в научной литературе отсутствует достаточная информация о результатах экспериментальных исследований по данной тематике, а также по разработке комплекса работ, направленных на реализацию данной научной идеи.

Цель работы заключается в разработке методов повышения экологической безопасности эксплуатации специальных транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания, работающих по циклу дизеля.

Задачи исследования:

1. Проанализировать состояние атмосферной экологической безопасности в крупной агломерации (мегаполисе) г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области, произвести оценку влияния вредных выбросов ДВС специального автотранспорта на экологические показатели и определить научные подходы к их снижению.

2. Выполнить теоретические исследования и построить математическую модель работы двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу дизеля, на примере двигателей Tector 4 и Tector 6.

3. Разработать технологию (операционно-постовые карты технического процесса установки водородного оборудования в дизельный двигатель автомобиля) производства работ по ТО, направленную на повышение экологической безопасности ДВС специального автотранспорта.

4. Провести экспериментальные сравнительные стендовые испытания на примере модернизированного ДВС Tector 4 и Tector 6 при добавке присадки водорода.

5. Обосновать экономическую эффективность результатов выполненных исследований для специальных транспортных средств.

Объектом исследований является Эксплуатационные методы повышения экологической безопасности ДВС специального автотранспорта, (на примере г. Санкт-Петербурга).

Предметом исследования является технология производства работ по ТО, реализующая применение присадки водорода в двигателях внутреннего сгорания, работающих по циклу дизеля.

Рабочая гипотеза. Может быть предложено совершенствование эксплуатационных методов, направленных на повышение экологической безопасности в процессе технического обслуживания специального автотранспорта и основанное на использовании примесей водорода в топливной смеси ДВС, работающих по принципу дизеля. Одним из весьма важных факторов, которые существенно влияют на эффективность применения примесей водорода, является сам способ их подачи в ДВС. Добавление водорода на такте впуска ДВС является самым простым способом его применения еще на ранних стадиях внедрения, но приводит к усложнению регулирования ДВС, а также не является безопасным из-за возможности образования взрывоопасной смеси во впускном тракте ДВС и ее воспламенению с последующим взрывом. Одним из возможных способов разрешения приведенной проблемы заключается в том, чтобы добавлять водород в дизельное топливо в магистраль высокого давления во время образования низкого давления с помощью специального устройства. При этом на таком давлении дизельное топливо будет насыщаться водородом и поступать в форсунку, а дальше происходит впрыскивание в цилиндр ДВС.

Научная новизна заключается в:

1. Разработке математической модели рабочего цикла ДВС, работающего при совмещенном цикле дизельного топлива и примесей водорода.
2. Экспериментально полученных зависимостях изменения характеристик рабочего цикла ДВС (повышение средней эффективной мощности, среднее значение крутящего момента и др.) при использовании водородно-дизельного смесового топлива.
3. Экспериментально полученных зависимостях изменения экологических характеристик ДВС (концентраций NO_x , средние значения выбросов SO_2 и др.) при использовании водородно-дизельного смесового топлива.
4. Разработке технологии повышения экологической безопасности путём использования водорода в качестве присадки для двигателей специальных автомобилей, как комплекс мероприятий при организации работ по ТО и текущего ремонта (ТР).

Теоретическая значимость исследования заключается в разработке нового научно-практического подхода к организации работ по ТО и ТР в виде комплекса мероприятий, позволяющих применять присадки водорода в работающие по циклу дизеля ДВС, направленного на повышение

топливной экономичности, эффективного КПД, снижению дымности и токсичности отработавших газов.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанной методики повышения экологической безопасности при эксплуатации специального автотранспорта в условиях Санкт-Петербургской агломерации.

Предложенные в диссертации разработки обеспечивают выполнение требований, заложенных в специальном техническом регламенте «О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, вредных (загрязняющих) веществ» (утверждён Постановлением Правительство Российской Федерации от 12.10.2005 г. № 609), в части обеспечения рекомендуемых норм в отработавших газах (ОГ) ДВС автотранспорта.

Методология и методы исследования. В настоящей диссертационной работе на основе системного подхода и многофакторного анализа сформулированы научные принципы эксплуатации и технического состояния двигателей специального автотранспорта, обеспечивающий комплексное снижение их отрицательного воздействия на окружающую среду при одновременном улучшении их топливно-экономических показателей.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 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»; п 15. «Технологические процессы и организация технического обслуживания, ремонта и сервиса; методы диагностики технического состояния автомобилей, агрегатов и материалов».

На защиту выносятся следующие положения:

1. Результаты анализа состояния атмосферной экологической безопасности в крупной агломерации г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области, оценка влияния вредных выбросов ДВС специального автотранспорта на экологические показатели и научные подходы к их снижению.

2. Математическая модель рабочего цикла ДВС, работающего при совмещенном цикле дизеля и примесей водорода.

3. Результаты экспериментальных исследований ДВС специального автотранспорта при использовании примесей водорода к топливу.

4. Экономическая оценка внедрения методики применения водорода в качестве добавки к дизельному топливу на специальных автомобилях.

Личный вклад автора. Автором на основе приведённого анализа была актуализирована задача обеспечения экологической безопасности при эксплуатации специальных автотранспортных средств в крупной агломерации

г. Санкт-Петербурга произведены теоретические и экспериментальные исследования технических параметров ДВС при использовании водородно-дизельного смесового топлива, разработана технология производства работ по ТО, направленная на повышение экологической безопасности ДВС специального автотранспорта и дана оценка экономической эффективности результатов выполненных исследований

Обоснованность и достоверность результатов исследований. Результаты диссертации обоснованы применением современных методов теоретического и экспериментального исследования, адекватно-поставленных научным задачам, а также сопоставлением полученных теоретических и экспериментальных результатов исследования, величина отклонения которых не превышала 15%.

Все полученные результаты не противоречат данными, полученными ранее в исследованиях другими авторами по данной тематике и подтверждены публикациями автора в изданиях, рецензируемых ВАК РФ.

Апробация работы. Материалы и результаты научного исследования доложены и одобрены на: 75-й научной конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета «Архитектура – строительство – транспорт» СПбГАСУ г. Санкт-Петербург (19–20 ноября 2019 года); 74-й международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» СПбГАСУ г. Санкт-Петербург (8-10 апреля 2021 года); международной конференции «Транспортная доступность АРКТИКИ: сети и системы», г. Санкт-Петербург (2-4 июня 2021 года); II-ом Всероссийском научном семинаре «Техническое обеспечение доступности арктических регионов», г. Санкт-Петербург (28 октября 2021 года).

Реализация результатов работы. Значимость результатов диссертационного исследования подтверждается: актом о внедрении в учебные программы ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» при реализации лекционных, практических и лабораторных занятий; актом внедрения АО «Автопарк №1 «Спецтранс».

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 7 статей, из них 5 статей в научных изданиях из перечня ВАК РФ и 1 монография.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, содержит 150 страниц текста, 74 формулы, 3 таблицы и 70 рисунков. Библиографический список включает 114 наименований.

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

В первой главе проведен анализ вопросов экологической безопасности, составлен аналитический обзор экологической безопасности в крупной агломерации г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области, проанализированы выбросы загрязняющих веществ от подвижного транспорта на территории г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области, произведена оценка влияния вредных выбросов ДВС специального автотранспорта на экологические показатели и предложены способы улучшения экологической обстановки в регионе.

Во второй главе разработаны: методика повышения экологической безопасности специального автотранспорта, математическая модель рабочих процессов в ДВС при использовании примесей водорода, технологический процесс модернизации системы питания ДВС и проведена проверка адекватности предложенной математической модели. Разработана оперативно-постовая карта технического процесса установки водородного оборудования в дизельный двигатель автомобиля при производстве работ по ТО.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования двигателей внутреннего сгорания специального автотранспорта при использовании примесей водорода. Эмпирическим путем проверена математическая модель процесса сгорания топлива с примесями водорода в ДВС специального автотранспорта, получена новая достоверная информация о процессе тепловыделения и содержании в отработавших газах вредных выбросов в атмосфере.

В четвертой главе проведено экономическое обоснование внедрения разработанных методов и технологии на базе автотранспортного предприятия ООО «ВК Сервис».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Результаты анализа состояние атмосферной экологической безопасности г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области и оценка влияния вредных выбросов ДВС специального автотранспорта на экологические показатели, определить научные подходы к их снижению.

Анализ распределения выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферу г. Санкт-Петербурга от ДВС автототранспортных средств показал, что их величина может достигать 80% концентраций от всех возможных загрязнений, в т.ч. и от постоянных источников. Такое распределение указывает на необходимость разработки и выполнения мероприятий, которые, прежде всего, могут заключаться в замене парка автототранспортных средств на новые, перевод ДВС на другой, более безопасный вид топлива. Использование специального автотранспорта в условиях города Санкт-Петербурга также влияет на экологическую безопасность. При этом возникает

актуальная задача, связанная со снижением вредных выбросов ДВС специального автотранспорта, которая может быть включена в комплексную систему, предназначенную для защиты окружающей среды Санкт-Петербурга. Соотношение вредных (загрязняющих) выбросов ДВС автотранспортных средств составляют в условиях Санкт-Петербурга: CO – 88,1%, CH – 79,0%, NO_x – 31,7%.

В результате выполненного анализа уровня загрязнения воздушного бассейна, отдельно для Санкт-Петербурга и Ленинградской области было установлено, что величины концентраций вредных (загрязняющих) выбросов находятся на довольно повышенном или же очень высоком уровнях (рис. 1).

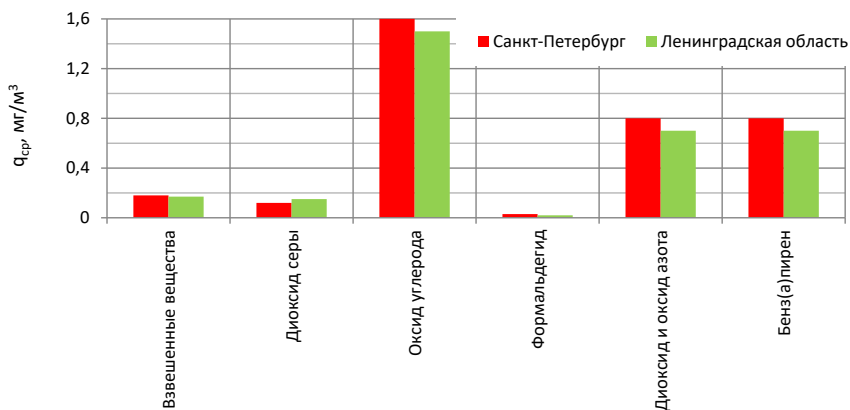


Рисунок 1 – Величина средних за 2019...2021 гг. концентраций различных веществ для отдельных субъектов

Одним из возможных способов разрешения приведенной проблемы является подача малых примесей водорода в дизельное топливо в магистраль высокого давления во время образования низкого давления с помощью специального устройства. В этой связи может быть предложено совершенствование эксплуатационных методов, направленных на повышение экологической безопасности, которое основано на введении в процесс технического обслуживания (или во время проведения ежедневного обслуживания и осмотра) контроля (мониторинга) вредных выбросов, которые осуществляют ДВС специального автотранспорта.

2. Математическая модель рабочего цикла ДВС, работающего при совмещенном цикле дизеля и примесей водорода.

Основными теоретическими методами при исследовании технических параметров ДВС специального автотранспорта является теория ДВС и последующее математическое моделирование. Для математического описания

процессов совмещенных циклов ДВС, работающего на дизельном топливе и примесях водорода, были использованы уравнения действительных физических явлений. Для этого действительный четырехтактный цикл условно разделяется на несколько участков, каждый из которых характеризуется определенными физическими явлениями и потому математически описывается соответствующими уравнениями. Эти участки отделяются фазами газораспределения, моментом зажигания рабочей смеси и продолжительностью ее горения. Для расчетов процессов на каждом из участков использовался метод объемного баланса, который не противоречит физической природе процессов и дает наиболее точные результаты.

Метод расчетов рабочего процесса совмещенных циклов дизеля и газа, в основе которого лежат дифференциальные уравнения объемного баланса, нашел широкое применение в практике двигателестроения.

В основу метода положено уравнение объемного баланса и уравнение адиабаты в дифференциальной форме:

$$dV = dV_n - dV_s + dV_b - dV_{Q_c} + dV_{Q_c} + dV_m, \quad (1)$$

$$dp = -\frac{k \cdot p}{V} \cdot dV, \quad (2)$$

где k – показатель адиабаты.

Для каждого участка действительного цикла ДВС, работающего на совмещенном цикле дизеля и примесей водорода, уравнение объемного баланса (1) имеет индивидуальные и особенности рабочего цикла.

В процессе сгорания изменяются массы компонентов рабочей смеси. Масса кислорода во время сгорания определяется по зависимости:

$$G_{O_2} = 0,23l_0 G_u ((\alpha - x) + \gamma(\alpha - 1)). \quad (3)$$

Значение массы образовавшегося водяного пара в процессе сгорания водорода:

$$G_{H_2O} = 9g_H G_u (x + \gamma) + G_{H_2O}^A \cdot M_{пов}, \quad (4)$$

где g_H – значение массовой части веса водорода; $G_{H_2O}^A$ – значение массовой части веса водяного пара, который присутствует в воздухе.

Значение массы образовавшегося углекислого газа в процессе сгорания:

$$G_{CO_2} = \frac{11}{3} g_C G_u (x + \gamma) + G_{CO_2}^П \cdot G_u, \quad (5)$$

где g_C – значение массовой части веса углерода, содержащегося в топливе;

$G_{CO_2}^П$ – значение массовой части веса углекислого газа, содержащегося в топливе.

Значение массы водорода во время сгорания:

$$G_{H_2} = g_{H_2} \cdot G_u \cdot (1 - x), \quad (6)$$

где g_{H_2} – массовая часть газа.

Изменение давления на участке сгорания за расчетный промежуток времени определяется по формуле:

$$dp = \frac{k \cdot p}{V} (dV_m + \frac{k-1}{k} \cdot \frac{dQ_x - dQ_r}{p} - dV_n), \quad (7)$$

где dV_m – изменение объема рабочего тела в цилиндре, которое вызвано изменением количества молей газа вследствие химических реакций, m^3 .

Показатели рабочего процесса описываются следующими уравнениями. Среднее индикаторное давление в цилиндре, Pa :

$$p_i = \frac{\int_{360}^{540} p dV - \int_{180}^{360} p dV}{V_h}. \quad (8)$$

Коэффициент избытка воздуха α описывается полиномиальной зависимостью от частоты обращения n_o и разрежения во впускном трубопроводе Δp_k :

$$\alpha = 0,662 + 0,00054 \cdot n_o + 0,0063 \cdot \Delta p_k - 1,885 \cdot 10^{-7} \cdot n_o^2 - 0,00012 \cdot \Delta p_k^2 + 9,06 \cdot 10^{-7} \cdot n_o \cdot \Delta p_k. \quad (9)$$

Результатом математического моделирования является закон сгорания для ДВС, работающего по смешенному циклу дизеля и примеси водорода.

Во время сгорания меняется химический состав рабочего тела в цилиндре и соответственно массы компонентов рабочей смеси. Часть новообразовавшихся веществ определяет закон сгорания, который имеет вид:

$$x = 1 - e^{-6,908 \cdot \left(\frac{\varphi - \varphi_{нг}}{\varphi_z(\Delta p_k)} \right)^{m(\Delta p_k) + 1}}, \quad (10)$$

где $m(\Delta p_k)$ – зависимость для определения показателя характера сгорания;

φ – угол поворота кривошипа;

$\varphi_{нг}$ – угол поворота кривошипа, который отвечает началу сгорания;

$\varphi_z(\Delta p_k)$ – зависимость для определения продолжительности сгорания.

Показатель характера сгорания (m) определяет продолжительность хода первой фазы сгорания. Для дизельных двигателей $m = 3 \dots 4$. Поскольку дизельное топливо с водородом образует более однородную смесь с воздухом, то время первой фазы сгорания сокращается и поэтому $m = 1 \dots 3$ (рисунк 2).

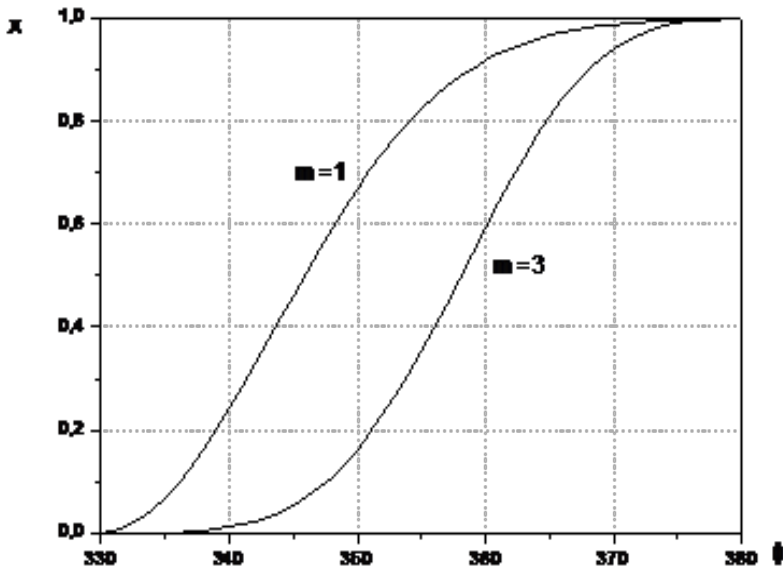


Рисунок 2 – Полученный закон сгорания для ДВС, работающего по смешенному циклу дизеля и примесей водорода

Сформированная математическая модель описания процессов совмещенных циклов ДВС, работающего на дизельном топливе и примесях водорода, основанная на уравнении действительных физических явлений, позволяет определить рациональные технические параметры ДВС, с целью последующей оценки вредных выбросов. Произведенные теоретические исследования позволили:

1. Сформировать математическую модель описания процессов совмещенных циклов ДВС, работающего на дизельном топливе и примесях водорода и может быть дана оценка вредных выбросов модернизированым ДВС.

2. Разработать операционно-постовую карту технического процесса установки водородного оборудования в дизельный двигатель для совершенствования системы ТО и ТР специального автотранспорта (рисунок 3), поддержки их технического состояния в соответствии с заданными уровнями экологических нормативов безопасности и проведения высококачественного обслуживания с целью улучшения характеристик ДВС специального автотранспорта.

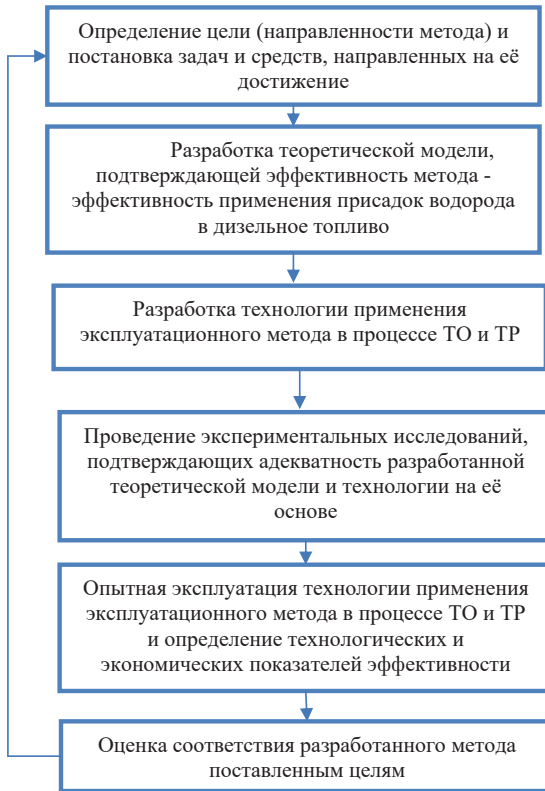


Рисунок 3 – Последовательность разработки эксплуатационных методов, применимых в процессе ТО и ТР специального транспортного средства, направленного на снижение вредных выбросов ДВС в атмосферу

3. Экспериментально полученные зависимости изменения экологические характеристики ДВС (концентраций NO_x , средние значения выбросов SO_2 и др.) при использовании водородно-дизельного смешанного топлива.

Для экспериментальных исследований ДВС специального автотранспорта применялся стенд (рис. 4), который позволяет определить индикаторные, эффективные показатели и уровень вредных выбросов ДВС при работе с примесями водорода. Данный стенд включает генератор Forte FGD6500E для обеспечения и регулировки нагрузки на исследуемый ДВС для работы с примесями водорода.

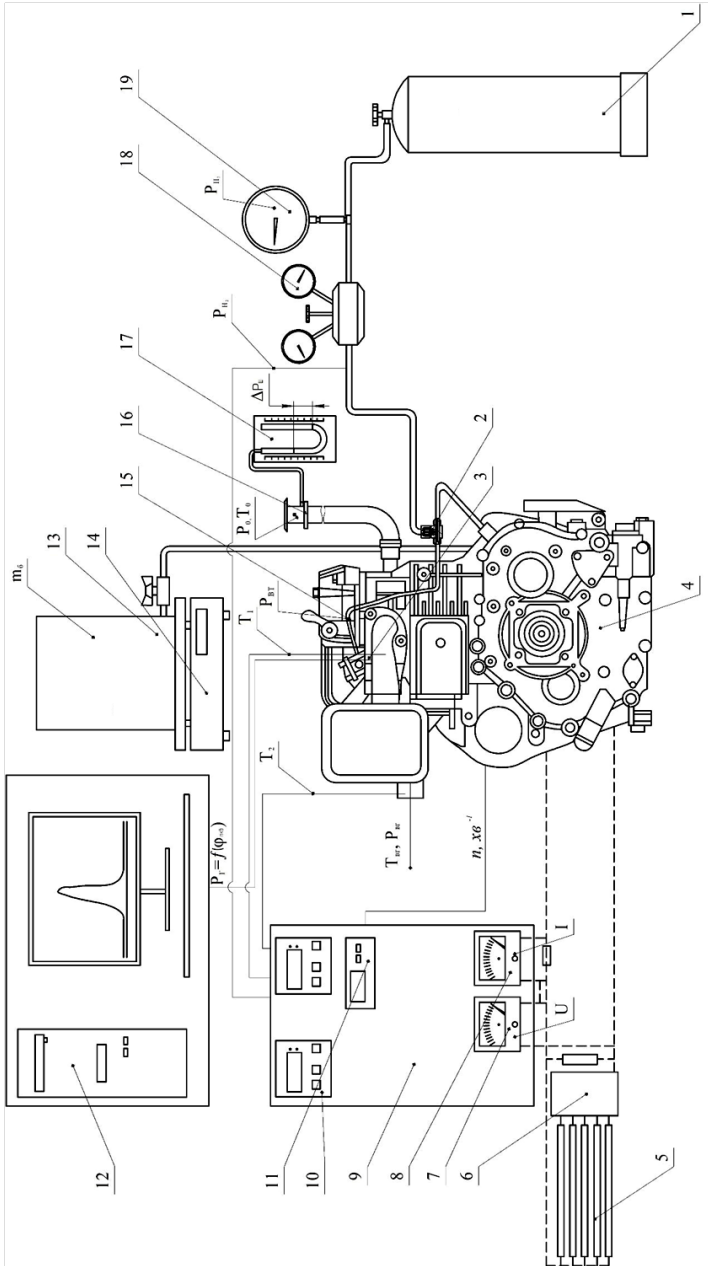


Рисунок 4 – Общая схема стенда для исследования ДВС следявоттранспорта: 1 – баллон с водородом; 2 – необратимый клапан добавления водорода; 3 – датчик давления; 4 – ДВС; 5 – блок ГЭНов; 6 – система управления нагрузкой; 7 – вольтметр; 8 – амперметр; 9 – панель приборов; 10 – прибор 2ГРМ1; 11 – тахометр; 12 – ПК; 13 – бак с горючим (ДГ); 14 – весы; 15 – датчик давления топливной смеси; 16 – расходомерная шайба; 17 – U-образный манометр; 18 – редуктор; 19 – манометр

Для того чтобы получить достоверную информацию по давлению был использован чувствительный элемент датчика Kistler 7613C, который был максимально приближен к камере сгорания, при этом степень сжатия оставалась неизменной. Результаты замеров индикаторного давления в ДВС специального автотранспорта передавались и обрабатывались на ПК 12. Отработанные газы через глушитель выпускались в окружающую среду.

Система измерения и регистрации экспериментальных данных определить скорость тепловыделения и уровень вредных выбросов в двигателе, работающем с примесями водорода. Для предотвращения влияния различных случайных факторов на большинстве режимов ДВС специального автотранспорта (для различной порции водорода) проводились повторные замеры и осциллографирование.

При выходе на режим частота вращения коленчатого вала ДВС определялась с помощью электронного тахометра «Вымпел». Для более точной регистрации частоты вращения использовался цифровой частотомер Ч4-34А с выходом на компьютерный измерительный комплекс. Абсолютная погрешность для диапазона частот вращения коленчатого вала ДВС (при 10...30 с⁻¹) составляет ± 1 с⁻¹.

Экспериментальные исследования ДВС при использовании примесей водорода к топливу проводили при температуре окружающей среды 298 К, атмосферном давлении 101 кПа по ГОСТ 3868-99 (соответствует стандарту EN 590: 2009). Значения параметров окружающей среды в процессе исследований были постоянными. Для двигателей Testor 4, мощностью 160 и 180 л.с. были получены зависимости эффективной мощности и крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала при дорожных испытаниях на автомобиле Iveco EuroCargo модели ML.

После обработки данных были построены зависимости средней эффективной мощности и среднего крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала двигателя Testor 4, мощностью 160 л.с., результаты которых приведены на рисунках 5 и 6.

Из приведенных зависимостей средней эффективной мощности от частоты вращения коленчатого вала двигателя Testor 4, мощностью 160 л.с. следует, что при добавке 0,15% водорода к топливной смеси происходит повышение средней эффективной мощности на 1,5...7,0 % по сравнению с базовым вариантом. Причем большие значения припадают на наименьшие значения частоты вращения коленчатого вала двигателя Testor 4. В случае добавки 0,25% водорода к топливной смеси двигателя Testor 4, мощностью 160 л.с. происходит повышение средней эффективной мощности на 2,0...11,0 % по сравнению с базовым вариантом. На номинальных оборотах коленчатого вала по сравнению с базовым вариантом, величина повышения эффективной мощности двигателя Testor 4, мощностью 160 л.с. составляет 3,3%.

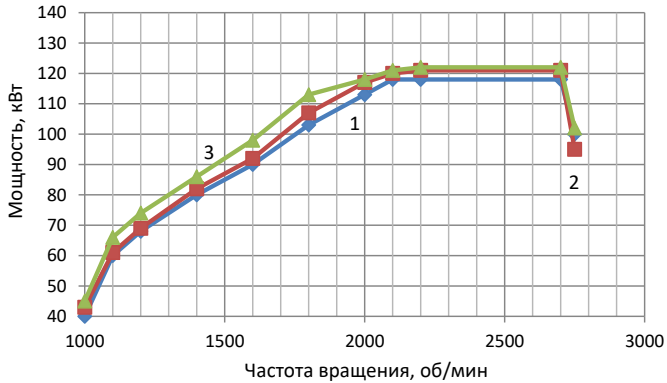


Рисунок 5 – Зависимости средней эффективной мощности от частоты вращения коленчатого вала двигателя Testor 4, мощностью 160 л.с.: 1 – базовая модель; 2 – при добавке 0,15% водорода к топливной смеси; 3 – при добавке 0,25% водорода к топливной смеси

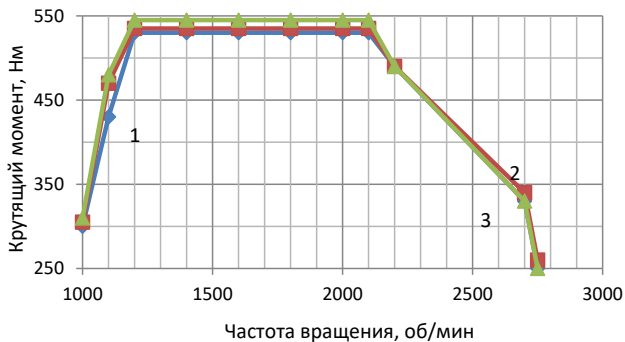


Рисунок 6 – Зависимости среднего крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала двигателя Testor 4, мощностью 160 л.с.: 1 – базовая модель; 2 – при добавке 0,15% водорода к топливной смеси; 3 – при добавке 0,25% водорода к топливной смеси

Зависимости среднего крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала двигателя Testor 4, мощностью 160 л.с., приведенные на рисунке 5, показывают, что при добавке 0,15% водорода к топливной смеси происходит увеличение данной величины на 1,3...8,5 % по сравнению с базовым вариантом, причем наибольшие значения припадают на 1100 об/мин. В случае применения добавки 0,25% водорода к топливной смеси – происходит повышение крутящего момента в 1,12 раз. На отдельных значениях частоты вращения коленчатого вала повышения не наблюдается, т.е. крутящий момент

имеет такое же значение, что и базовый вариант двигателя. Во время проведения экспериментальных исследований давление водорода изменялось в соответствии с величиной расходов в аккумулирующей камере. Существенное влияние на максимальное давление впрыска отмечено при увеличении давления подачи водорода.

– Наличие водородной примеси с давлением подачи 0,2 МПа приводит к уменьшению максимального давления впрыска на 5...8%, при использовании серийной форсунки ДВС.

– Увеличение давления подачи водорода до 0,25 МПа в ДВС приводит к уменьшению максимального давления впрыска на 10...12%.

– Увеличение давления подачи водорода до 0,3 МПа в ДВС приводит к уменьшению максимального давления впрыска на 15...18%.

– При увеличении давления подачи водорода до 0,45 МПа максимальное давление впрыска уменьшается на 18...25%.

Такой результат можно объяснить потерями давления на сжатие газообразного водорода и «сглаживание» волновых колебаний в топливном трубопроводе высокого давления со «смягчением» посадки нагнетательного клапана. По результатам исследований видно (рис. 7), что при сравнении диаграмм впрыска в зоне посадки иглы существуют характерные изменения, а именно: отсутствие волн разрежения на диаграмме с добавлением водорода; динамические колебания в топливопроводе через подачу водорода через клапан.

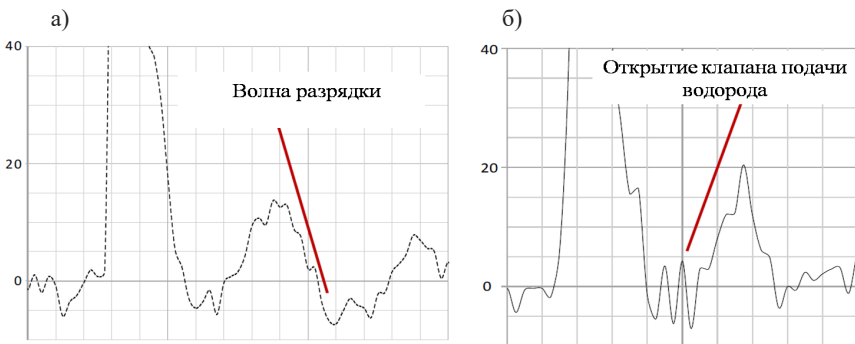


Рисунок 7 – Диаграммы давления водорода в топливопроводе высокого давления в ДВС: а – без водорода; б – с водородом

Определено: каким образом примесь водорода к дизельному топливу ДВС будет влиять на количество вредных выбросов, в связи с этим были выполнены исследования выбросов без нагрузки и под нагрузкой (номинальная грузоподъемность) двигателей Tector 4 и Tector 6, установленных на автомобиле Iveco EuroCargo. Результаты исследования влияния водорода

на экологические показатели двигателя представлены на рисунках 8...10. На всех диаграммах принимаются следующие условные обозначения: 1 – базовая модель; 2 – при добавке 0,15% водорода к топливной смеси; 3 – при добавке 0,25% водорода к топливной смеси.

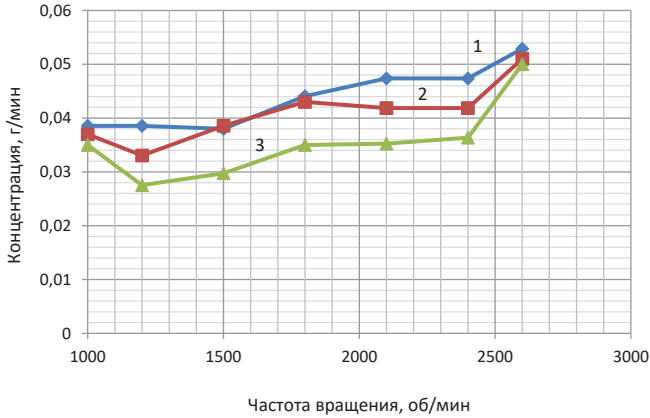


Рисунок 8 – Зависимости средних значений выбросов NO для двигателя Tector 6, установленного на автомобиле Iveco EuroCargo, мощностью 220 л.с. под нагрузкой от частоты вращения коленчатого вала

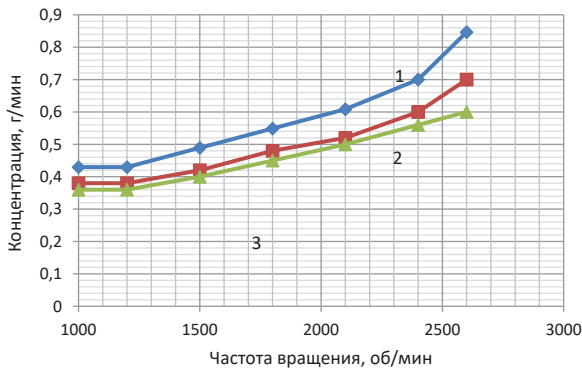


Рисунок 9 – Средние зависимости выбросов CO от частоты вращения коленчатого вала двигателя Tector 6, мощностью 280 л.с., установленного на автомобиле Iveco EuroCargo в режиме нагрузки

Установлено: что при добавке 0,15% водорода к топливной смеси происходит повышение средней эффективной мощности до 9,0 % по сравнению с базовым вариантом. Причем большие значения припадают на наименьшие значения частоты вращения коленчатого вала двигателя. В случае добавки

0,25% водорода к топливной смеси происходит повышение средней эффективной мощности на 1,5...14,3 % по сравнению с базовым вариантом.

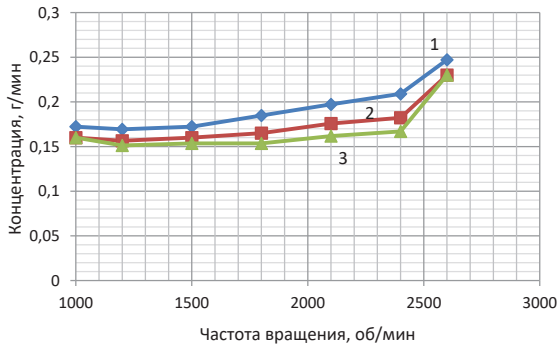


Рисунок 10 – Средние зависимости выбросов NO_x от частоты вращения коленчатого вала двигателя Tector 6, мощностью 280 л.с., установленного на автомобиле Iveco EuroCargo в режиме нагрузки

Среднее значение крутящего момента в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя при добавке 0,15% водорода к топливной смеси имеет высшее значение на 1,3...8,5 % по сравнению с базовым вариантом. В случае применения добавки 0,25% водорода к топливной смеси – происходит повышение крутящего момента на 2,4...3,7 %. Расход топлива в количественном эквиваленте практически не изменялся для всех групп ДВС специального автотранспорта.

Также исследованы экологические характеристики ДВС специального автотранспорта. Так, в случае добавки 0,15% водорода к топливной смеси двигателя происходит снижение выбросов CO в 1,28...1,71 раза по сравнению с базовым вариантом, что, скорее всего, связано с интенсификацией реакции горения при попадании водорода в камеру сгорания и его частичной замены воздушно-дизельной смеси. При добавке 0,25% водорода к топливной смеси, для этого же случая, происходит уменьшение концентраций CO в 1,5...2,4 раза. Причиной снижения является тоже, включая лучшее смесеобразование в камере сгорания двигателя. Значения концентраций NO_x при добавке 0,15% водорода к топливной смеси двигателя снижаются в 1,1...1,8 раз по сравнению с базовым вариантом. Рассматривая случай добавки 0,25% водорода к топливной смеси исследуемого двигателя, наблюдается более интенсивное снижение выбросов NO_x для всех частот вращения коленчатого вала, при этом значение снизилось в 1,52...2,4 раза по сравнению базовым вариантом.

Также зафиксировано уменьшение выбросов HC для двигателей для двух способов добавки водорода в ДВС специального автотранспорта. При этом, для случая добавки 0,15% водорода к топливной смеси происходит

снижение НС в 1,17...1,6 раз по сравнению с базовой моделью, а при добавке 0,25% водорода к топливной смеси двигателя Tector 4 – в 1,43...2,25 раз.

Значения выбросов SO_2 для базовой модели двигателя выше в 1,4...2,25 раза по сравнению с двигателем с добавкой 0,15% водорода к топливной смеси в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и в 1,6...4,0 раза выше, чем в двигателе с добавкой 0,25% водорода к топливной смеси.

В целом, концентрации вредных веществ для всех исследуемых ДВС имели тенденцию снижения при добавке примесей водорода к топливной смеси.

4. Экономическая оценка внедрения методики применения водорода в качестве добавки к дизельному топливу на специальных автомобилях предприятия ООО «ВК Сервис».

Предложенные мероприятия по применению дизелей автомобилей с добавкой 0,25...0,5% водорода во впускной коллектор (что соответствует добавке 0,15% водорода к топливной смеси) в условиях ООО «ВК Сервис» предполагают капитальные вложения, которые приведены в таблице 1. Результаты расчетов интегрированного экономического эффекта представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Капитальные вложения при организации эксплуатации дизелей для 100 автомобилей с добавкой 0,25...0,5% водорода во впускной коллектор в условиях ООО «ВК Сервис»

№ пп	Наименование затрат	Стоимость, млн. руб.
1	Проектные разработки внедрения водородной установки в конструкцию дизелей	10,22
2	Детали и материалы	5,3
3	Расходы на оборудование дизелей водородной установкой	5,2
4	Прочее	0,3
	Итого	21,02

Таблица 2 – Результаты расчета интегрального экономического эффекта при организации эксплуатации дизелей для 100 автомобилей с добавкой 0,25...0,5% водорода во впускной коллектор

Годы	Капитальное вложение для внедрения, млн. руб.	Величина годовой суммарной экономии текущих затрат на внедрение, млн. руб.	Величина годовой суммарной экономии текущих затрат на внедрение, приведенная к расчетному году, млн. руб.	Чистый дисконтированный доход (ЧДД), млн. руб.
1	2	3	4	5
2023	21,02	4,67	4,67	-16,35
2024		4,67	4,169643	-12,1804

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
2025		4,67	3,722895	-8,45746
2026		4,67	3,324014	-5,13345
2027		4,67	2,967869	-2,16558
2028		4,67	2,649883	0,484305
2029		4,67	2,365967	2,850272
2030		4,67	2,112471	4,962743
2031		4,67	1,886135	6,848878
2032		4,67	1,684049	8,532927
2033		4,67	1,503615	10,03654

Было установлено, что годовая экономия затрат на топливо в условиях ООО «ВК Сервис» составляет: при добавке 0,25...0,5% водорода во впускной коллектор – 1,31 млн руб. Также был рассчитан чистый дисконтированный доход, который за 10 лет эксплуатации специального автотранспорта ООО «ВК Сервис» составит: при добавке 0,25–0,5% водорода во впускной коллектор – 10,03654 млн. руб. Срок окупаемости капитальных вложений при внедрении добавки 0,25–0,5% водорода во впускной коллектор дизеля в условиях ООО «ВК Сервис» составляет 5 лет.

На рис. 11 представлена графическая форма интерпретации расчета ЧДД, на котором виден темп изменения ЧДД по годам инвестиционного проекта при внедрении добавки 0,25...0,5% водорода во впускной коллектор дизеля в условиях ООО «ВК Сервис».

Чистый дисконтированный доход (ЧДД), млн. руб.

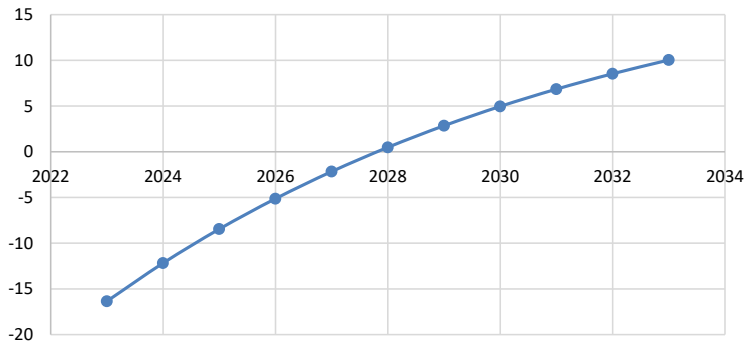


Рисунок 11 – Изменение ЧДД по годам проекта при организации ТО с внедрением добавки 0,7...0,8% водорода во впускной коллектор дизеля в условиях ООО «ВК Сервис»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам диссертационного исследования можно делать следующее заключение:

1. Изучено и проанализировано состояние вопроса экологической безопасности г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Проанализированы пути повышения экологической безопасности при использовании специального автотранспорта в условиях городской агломерации через оценку влияния вредных выбросов ДВС и определены научные подходы к их снижению.

2. Разработана математическая модель описания процессов совмещенных циклов ДВС, работающего на дизельном топливе и примесях водорода, основанная на уравнении действительных физических явлений, с помощью которой могут быть определены рациональные технические параметры ДВС. Установлена адекватность разработанной математической модели, которая была проверена по отклонениям значений скорости распределения потоков газа в камере сгорания модернизированного ДВС, полученных при моделировании и в эксперименте на стенде. Наибольшее расхождение составило 5,7%.

3. Разработана операционно-постовая карта технического процесса установки водородного оборудования в дизельный двигатель автомобиля для производства работ по ТО, направленную на повышение экологической безопасности ДВС специального автотранспорта.

4. Произведены экспериментальные исследования для ДВС специального автотранспорта: Tector 4 и Tector 6. При этом установлено, в случае добавки 0,15% водорода к топливной смеси двигателя происходит снижение выбросов CO в 1,28...1,71 раза по сравнению с базовым вариантом, а при добавке 0,25% водорода к топливной смеси, происходит уменьшение концентраций CO в 1,5...2,4 раза. Значения концентраций NO_x при добавке 0,15% водорода к топливной смеси двигателя снижаются в 1,1...1,8 раз по сравнению с базовым вариантом, добавка 0,25% водорода к топливной смеси исследуемого двигателя, наблюдается более интенсивное снижение выбросов NO_x для всех частот вращения коленчатого вала, при этом значение снизилось в 1,52...2,4 раза по сравнению базовым вариантом. Также зафиксировано уменьшение выбросов HC для двигателей для двух способов добавки водорода в ДВС специального автотранспорта. В целом, концентрации вредных веществ, для всех исследуемых ДВС имели тенденцию снижения при добавке примесей водорода к топливной смеси.

5. Дана экономическая оценка эксплуатационных методов повышения экологической безопасности специального автотранспорта, основанного на технологии добавки водорода в топливо ДВС разработанной системы добавки водорода в дизель в условиях ООО «ВК Сервис». Определено, что срок окупаемости капитальных вложений при внедрении добавки 0,25 ...0,5% водорода во впускной коллектор дизеля в условиях ООО ВК Сервис» составляет 5 лет.

Перечисленные результаты решения задач исследования говорят о том, что цель работы – разработка эксплуатационных методов повышения

экологической безопасности специального автотранспорта, основанных на технологии добавки водорода в топливо ДВС, работающих по циклу дизеля достигнута.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ:

1. **Абызов И.Т.** Перспективные пути повышения экологической безопасности автобусного парка страны / С.А. Евтюков, С.А. Воробьев, И.Т. Абызов // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 6(59). – С. 213–215. (0,31 п.л.).
2. **Абызов И.Т.** Исследование экологической безопасности спецавтотранспорта с дизельным ДВС / С.А. Воробьев, И.Т. Абызов, П.А. Разумов // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 1(84). – С. 127–132 (0,75 п. л.).
3. **Абызов И.Т.** Применение аммиака в качестве моторного топлива для автомобилей, эксплуатируемых в условиях Арктического региона / И.Т. Абызов С.А. Воробьев, О.А. Никифоров // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – № 2(91). – С. 129–134. (0,38 п. л.).
4. **Абызов И.Т.** Применение продуктов процесса реформинга аммиака для питания двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу Дизеля / С.А. Воробьев, И.Т. Абызов, П.А. Разумов // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – № 3(92). – С. 126–130. (0,32 п. л.).
5. **Абызов И.Т.** Модель реформинга аммиака для генерации водорода в целях использования в качестве присадки к основному виду топлива в ДВС / И.Т. Абызов // Грузовик №7. 2022. – С, 18–21. (0,25 п. л.)

Монографии

6. **Абызов И.Т.** Обеспечение экологической безопасности специальных транспортных средств, эксплуатируемых в условиях мегаполиса / И.Т. Абызов // Издательский дом «Петрополис», Санкт-Петербург, 2022. – 140 с. (8,75 п.л.).

Научные статьи в изданиях РИНЦ и сборниках трудов научных конференций

7. **Абызов И.Т.** Актуальность применения водородного топлива на автомобильном транспорте в современных условиях эксплуатации / С.А. Воробьев, И.Т. Абызов, П.А. Разумов // Вопросы устойчивого развития общества. 2022. № 4. С. 1516–1519 (0,8 п.л.).

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 07.04.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 51.

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.