

*На правах рукописи*

**Простов Евгений Евгеньевич**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ  
ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ НА ГАЗОМОТОРНОМ ТОПЛИВЕ  
ПОСРЕДСТВОМ КОНТРОЛЯ СОСТАВА ГАЗОВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ**

2.10.1. Пожарная безопасность  
(технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет  
ГПС МЧС России»

**Научный  
руководитель:**

**ГОРДИЕНКО Денис Михайлович**  
доктор технических наук

**Официальные  
оппоненты:**

**ТАНКЛЕВСКИЙ Леонид Тимофеевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого», базовая кафедра пожарной  
безопасности при ООО «Гефест», заведующий;

**ГРОХОТОВ Михаил Андреевич**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Академия ГПС МЧС России», кафедра  
пожарной безопасности технологических процессов в  
составе учебно-научного комплекса пожарной  
безопасности объектов защиты, заместитель начальника.

**Ведущая  
организация:**

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной  
технический университет».

Защита состоится «13» ноября 2024 года в 16:00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 04.2.003.01 на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России» (196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 149).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России» (196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 149) и на сайте <https://dsovet.igps.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 04.2.003.01  
кандидат технических наук, доцент

М.Р. СЫТДЫКОВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Развиваемые в последние годы идеи по модернизации и обновлению парка транспортных средств основаны на безопасности, экологии и надежности перевозок пассажиров и грузов. При решении поставленных задач особое внимание уделяется вопросам замещения традиционных видов моторных топлив (автомобильный бензин, дизельное топливо) наиболее распространенным альтернативным видом – газомоторным топливом, обладающим лучшими экономическими и экологическими свойствами.

Наиболее перспективные виды газомоторного топлива: это природный газ (метан) и углеводородные газы (пропан-бутановые смеси). В настоящее время компримированный природный газ (далее – КПГ) и сжиженный углеводородный газ (далее – СУГ) являются наиболее широко используемыми видами топлива для двигателей внутреннего сгорания.

В зданиях по обслуживанию газомоторных автомобилей нередко возникают аварийные ситуации, которые могут сопровождаться пожаром и взрывом различной степени тяжести, а также человеческими жертвами и значительным материальным ущербом как на объектах, так и на рядом расположенных территориях. Для обеспечения пожарной безопасности таких объектов уже на стадии проектирования следует учитывать возможные аварии и опасности, связанные с наличием автомобилей, работающих на газомоторном топливе.

Следовательно, существует необходимость в аналитических и экспериментальных исследованиях, направленных на повышение пожарной безопасности зданий по обслуживанию газомоторных автомобилей, что позволило сформулировать **научную задачу**, заключающуюся в разработке методики обеспечения пожарной безопасности зданий по обслуживанию газомоторных автомобилей путем повышения эффективности применения газоанализаторов (в том числе датчиков довзрывных концентраций и газосигнализаторов) при контроле состояния газовой среды на указанных объектах.

### **Степень разработанности темы исследования**

Большой вклад в решение вопросов оценки пожарной опасности объектов с обращением газомоторного топлива внесли: А.Я. Корольченко, Г.В. Васюков, И.А. Болодьян, Ю.Н. Шебеко, И.М. Смолин, А.Г. Никитин, В.А. Пчелинцев, В.Я. Орлов, А.Н. Баратов, И.М. Абдурагимов, И.Р. Бегишев, В.И. Макеев, С.Г. Цариченко, В.В. Рубцов, В.А. Рабинков, Ю.Д. Моторыгин, Р.А. Загуменников, В.Д. Захматов, Г.К. Ивахнюк и др.

**Объектом исследования** является система обеспечения пожарной

безопасности объектов обслуживания автомобилей, работающих на газомоторном топливе.

**Предмет исследования** – эффективность применения газоанализаторов при обеспечении пожарной безопасности объектов обслуживания автомобилей на газомоторном топливе.

Таким образом, **цель исследования** заключается в повышении уровня обеспечения пожарной безопасности объектов обслуживания автомобилей на газомоторном топливе.

Для достижения поставленной цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ пожарной опасности автомобилей на газомоторном топливе и обзор требований отечественных и зарубежных нормативных документов к системе обеспечения пожарной безопасности предприятий. Разработать метод определения частоты возникновения пожаров в зависимости от площади объекта на предприятиях по обслуживанию автомобилей на газомоторном топливе и помещений с наличием газобаллонного оборудования.

2. Провести экспериментальные исследования для изучения процессов распространения газа в закрытых помещениях при разгерметизации автомобилей, работающих на газомоторном топливе и построения математических моделей процессов образования взрывоопасных газоздушных смесей с обоснованием алгоритма оценки эффективности применения газоанализаторов при контроле состояния воздушной среды.

3. Разработать методику повышения уровня пожарной безопасности предприятий по обслуживанию автомобилей на газомоторном топливе на основе совершенствования нормативных требований и повышения эффективности применения газоанализаторов при осуществлении контроля состояния воздушной среды.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Обоснован новый метод определения частоты возникновения пожара, учитывающий статистические показатели о количестве возгораний, площадь объекта и число размещенных в нем автомобилей, работающих на газомоторном топливе.

2. Разработан алгоритм оценки эффективности газоанализаторов, основанный на предварительном моделировании полей концентраций при утечках горючих газов и отличающийся от известных возможностью учета вероятности эффективного размещения датчиков довзрывных концентраций.

3. Предложена методика повышения уровня пожарной безопасности предприятий по обслуживанию автомобилей с газобаллонным оборудованием,

базирующаяся на комплексе научно-обоснованных нормативных требований, уточненных результатах расчетов частот возникновения пожара и учете показателя эффективности работы газоанализаторов при оценке пожарного риска.

Научные результаты, полученные в диссертационной работе, соответствуют паспорту специальности 2.10.1. Пожарная безопасность, а именно п.12 «Разработка научных основ создания систем, методов и технических средств обнаружения, предупреждения и ликвидации аварий, пожаров и взрывов» и п. 14 «Исследование условий, разработка и совершенствование методов оценки и способов снижения пожарных рисков на объектах защиты и прилегающих к ним территориях».

#### **Теоретическая значимость работы заключается в:**

установлении взаимосвязи между площадью помещения, в котором находятся автомобили, работающие на газомоторном топливе, и частотой возникновения пожара в этих помещениях;

развитии методов оценки эффективности применения элементов систем противопожарной защиты;

обосновании возможности использования программного комплекса ANSYS при моделировании поступления горючих газов в закрытое помещение, без необходимости проведения физических экспериментов.

#### **Практическая значимость работы состоит в следующем:**

методика повышения уровня пожарной безопасности предприятий по обслуживанию автомобилей на газомоторном топливе с учетом возможных утечек горючих газов использована при разработке свода правил по пожарной безопасности СП 364.1311500 «Здания и сооружения для обслуживания автомобилей. Требования пожарной безопасности», а также при разработке Изменение № 1 СП 364.1311500 «Здания и сооружения для обслуживания автомобилей. Требования пожарной безопасности»;

определена возможность количественной оценки эффективности элементов систем противопожарной защиты, в частности, газоанализаторов.

#### **Методы исследования**

Для решения поставленных задач использованы методы математического моделирования, теории вероятности и математической статистики, натурального эксперимента, математической обработки экспериментальных данных, регрессионного и корреляционного анализа, наблюдения, сравнения, описания и обобщения.

Информационной основой исследования являлись отечественные и зарубежные литературные, правовые и нормативные источники, материалы расследований пожаров, а также научно-исследовательские работы в области обеспечения пожарной безопасности на предприятиях по обслуживанию

автомобилей, работающих на газомоторном топливе.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод определения частоты возникновения пожаров на объектах обслуживания автомобилей, работающих на газомоторном топливе.

2. Алгоритм оценки эффективности газоанализаторов на объектах обслуживания автотранспорта на газомоторном топливе с расчетно-экспериментальным обоснованием расстановки газоанализаторов в помещениях с автомобилями, оснащенных газобаллонным оборудованием.

3. Методика повышения уровня пожарной безопасности предприятий по обслуживанию автомобилей на газомоторном топливе с учетом возможных утечек горючих газов.

#### **Степень достоверности** полученных результатов подтверждается:

удовлетворительной сходимостью результатов численного моделирования и экспериментального исследования распространения газа (пропана) в помещении;

использованием аттестованной измерительной аппаратуры, апробированных методик измерения и обработки экспериментальных данных;

внутренней непротиворечивостью результатов и их согласованностью с данными других исследователей.

#### **Реализация работы**

Материалы диссертации реализованы при разработке свода правил СП 364.1311500.2018 «Здания и сооружения для обслуживания автомобилей. Требования пожарной безопасности» и изменений №1 СП 364.1311500.2018.

#### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них 10 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России, в том числе 4 работы опубликованы без соавторов.

#### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: XII Международная научно-практическая конференция, посвященная году гражданской обороны. «Пожарная и аварийная безопасность» (Москва, 2017), XXX Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности» (г. Москва, 2018); XXXII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности» (г. Москва, 2020); XXXIV Международная научно-практическая конференция, посвященная 85-летию образования ФГБУ ВНИИПО МЧС России «Актуальные проблемы пожарной

безопасности» (г. Москва, 2022), XXXV Международная научно-практической конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности» (г. Москва, 2023).

### **Личный вклад автора**

Основные научные результаты исследования, выносимые на защиту получены автором лично и опубликованы в научных статьях. Предложен метод определения частоты возникновения пожаров на объектах обслуживания автомобилей, работающих на газомоторном топливе, а также алгоритм оценки эффективности газоанализаторов на объектах обслуживания автомобилей на газомоторном топливе, разработана методика повышения уровня пожарной безопасности.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, приложения. Содержание работы изложено на 127 страницах текста, включает в себя 10 таблиц, 64 рисунка, список литературы из 100 наименований, приложение на 2-х страницах.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы и степень ее разработанности, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, показана научная новизна работы, её теоретическая и практическая значимость, представлены методология и методы исследования, а также степень достоверности и апробация результатов.

**В первой главе «Анализ пожарной опасности объектов по обслуживанию автомобилей на газомоторном топливе»** проведен анализ пожарной опасности автомобилей, работающих на газомоторном топливе (далее – ГБА), рассмотрено устройство газобаллонного оборудования (далее – ГБО), собраны и проанализированы статистические данные по пожарам на ГБА, описаны аварии с пожарами и взрывами ГБА.

Проведен анализ нормативных требований к системе обеспечения пожарной безопасности предприятий по обслуживанию ГБА, рассмотрены отечественные и иностранные требования пожарной безопасности к зданиям и помещениям для обслуживания и хранения ГБА.

Обзор требований отечественных и международных нормативных документов, регламентирующих требования пожарной безопасности для зданий по обслуживанию ГБА, а также различной научной литературы показал, что подход к обеспечению пожарной безопасности такого рода объектов требует проработки и уточнений необходимых требований для зданий и сооружений по техническому обслуживанию ГБА.

Анализ статистических данных за период 2015-2022 г.г., приведенных в

Таблице 1 показал, что главными причинами возникновения пожаров на ГБА являются нарушения правил устройства и эксплуатации (далее – НПУиЭ) транспортных средств и НПУиЭ газового оборудования.

Таблица 1 – Причины и количество пожаров на различных транспортных средствах с ГБО в России за период 2015 – 2022 г.г.

	НПУиЭ транспортных средств	НПУиЭ газового оборудования	Поджог	Другие причины
Грузовые автомобили	1447	96	276	308
Автобусы	690	31	103	105
Легковые автомобили	4688	261	1417	1193

Статистические данные по авариям приведены на единицу оборудования (автомобиля), а методология расчета пожарного риска в помещениях оперирует частотой возникновения пожара на единицу площади помещения (здания), поэтому эти статистические данные для расчета индивидуального пожарного риска необходимо преобразовать.

Частота возникновения пожара зависит от площади объектов и определяется по зависимости:

$$Q_{\Pi} = a \cdot F^b, \text{ год}^{-1}, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b$  – константы, указанные в Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов;

$F$  – площадь рассматриваемого здания,  $\text{м}^2$ .

В помещениях хранения и обслуживания автотранспортных средств (далее – АТС) основной пожарной нагрузкой являются именно АТС, в том числе топливо, поэтому величину « $a$ » можно выразить как отношение количества аварий на типовом оборудовании к количеству видов оборудования в рассматриваемой группе за период времени.

Газобаллонное оборудование является составной частью конструкции ГБА, поэтому при комплексной оценке частот возникновения пожаров на ГБА учтены статистические данные о пожарах и авариях отдельно для газобаллонного оборудования.

Для определения частоты возникновения пожаров на объектах с хранением и обслуживанием ГБА проведен анализ статистических данных по количеству транспортных средств в России, по количеству автомобилей с установленным ГБО, а также количеству пожаров на них. Выявлены и проанализированы основные причины пожаров на автомобилях без устройства ГБО и с ним.

На Рисунке 1 приведены статистические данные за период с 2015 по 2022 г.г. о пожарах на транспортных средствах, работающих на жидком моторном топливе (далее – ЖМТ) и на газовом моторном топливе (далее – ГМТ), а также количество пожаров, причиной которых стало отдельно ГБО.

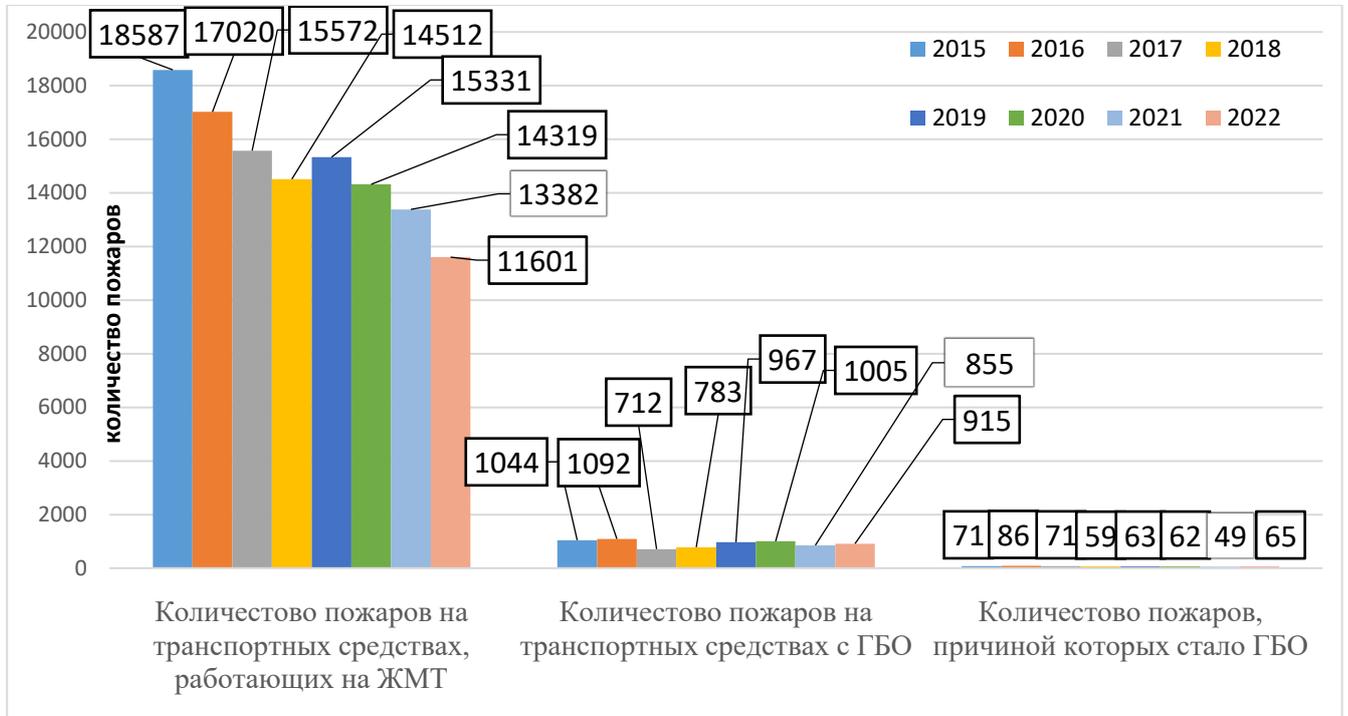


Рисунок 1 – Количество пожаров на транспортных средствах, в том числе причиной которых стала разгерметизация ГБО

Процентное соотношение количества пожаров на ГБА в России в период с 2015 по 2022 года, которые произошли вследствие НПУиЭ газового оборудования, распределенные по четырем основным причинам, представлены на Рисунке 2.

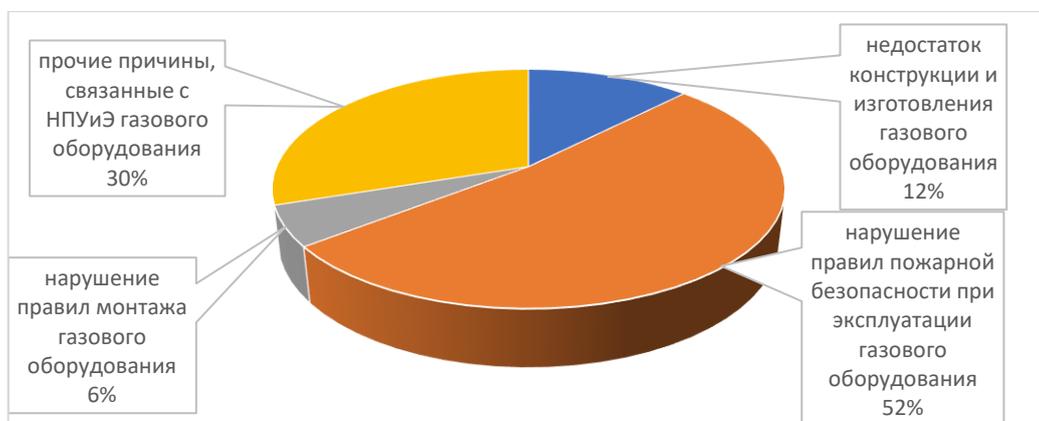


Рисунок 2 – Количество пожаров на ГБА в России в период с 2015 по 2022 года, которые произошли вследствие НПУиЭ газового оборудования

Были получены статические данные на основе сведений МВД России, из которых следует, что в 2022 году в России зарегистрировано 64474288 единиц автомобилей ( $N_{\text{тр}2}$ ), из них с установленным ГБО и имеющие возможность использовать природный газ в качестве моторного топлива 1308522 единиц автомобилей ( $N_{\text{тр}1}$ ).

Из полученных в ФГБУ ВНИИПО МЧС России данных можно выделить три важных показателя по количеству пожара:

- количество пожаров автотранспортных средств с ГБО с 2015 по 2022 год, причиной которых стало именно ГБО ( $N_1 = 526$ );

- количество пожаров автотранспортных средств с ГБО с 2015 по 2022 год, причиной которых стало не ГБО ( $N_2 = 7373$ );

- количество пожаров автотранспортных средств без установленного ГБО с 2015 по 2022 год ( $N_3 = 120324$ ).

Из анализа полученных статистических данных определены коэффициенты «а» для ГБА (Таблица 2).

Таблица 2 – Определение статистического показателя «а»

для ГБА причиной которых стало именно ГБО	для ГБА причиной которых стало не ГБО	Для жидкого моторного топлива (ГБА не учитывались при расчете)	Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов
$\frac{N_1}{T \times N_{\text{тр}1}}$	$\frac{N_2}{T \times N_{\text{тр}1}}$	$\frac{N_3}{T \times N_{\text{тр}2}}$	
a= 0,0000574	a = 0,000805	a = 0,0002666	a = 0,0001200

T– рассматриваемый временной промежуток (год);

$N_n$ – количество пожаров автотранспортных средств данного типа.

Из приведенного анализа следует, что при расчете пожарного риска для определения частоты возникновения пожара на объектах хранения и обслуживания автотранспортных средств величину коэффициента «а» следует применять в зависимости от вида моторного топлива, которое используется при эксплуатации АТС (Таблица 2).

Величина коэффициента b характеризует скорость нарастания количества пожаров от площади зданий определенного типа, для объектов транспорта значение этого коэффициента составляет 0,86.

Значения «а» и «b» в пособии по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов определены для двигателей на ЖМТ,

поэтому возможно определить зависимость количества пожаров на автотранспорте, работающем на ЖМТ, исходя из величины коэффициента «b».

При использовании коэффициента «b», равного 0,86 для значения площадей объекта от 100 м<sup>2</sup> до 3000 м<sup>2</sup> с шагом 100 м<sup>2</sup>, получается графическая зависимость, приведенная на Рисунке 3.

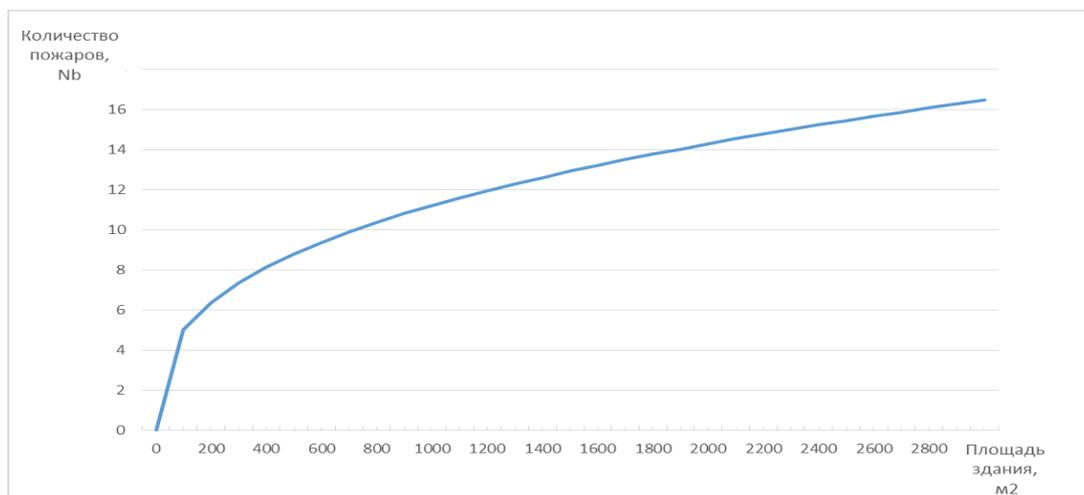


Рисунок 3 – Скорость нарастания количества пожаров на объектах обслуживания транспорта от площади этих объектов

Зависимость, приведенная на Рисунке 3, справедлива только для АТС, работающих на ЖМТ, но принципиальное отличие АТС, работающих на газовом топливе и жидком моторном топливе, заключается в виде топливной системы.

Количество пожаров на АТС равно сумме пожаров, возникших на каждом типе оборудования, из которого состоит автомобиль:

$$N_{АТС} = N_{НПУиЭ \text{ электр.}} + N_{НПУиЭ ТС} + N_{НПУиЭ \text{ узлов и механизмов}} + N_{НПУиЭ АТС} , \quad (2)$$

где:  $N_{НПУиЭ \text{ узлов и механизмов}}$  – неисправность систем, механизмов и узлов транспортного средства;

$N_{НПУиЭ ТС}$  – неисправность топливной системы (для ГБА это значение соответствует  $N_{НПУиЭ \text{ газового оборудования}}$  для ЖМТ);

$N_{НПУиЭ АТС}$  – прочие причины, связанные с нарушением правил устройства и эксплуатации транспортных средств;

$N_{НПУиЭ \text{ электр.}}$  – неисправность электрооборудования транспортного средства.

Частота возникновения пожаров на АТС будет отличаться только наличием или отсутствием ГБО в автомобиле. Значение количества пожаров, приходящееся на единицу площади защищаемого объекта, и общее количество пожаров на таких

объектах пропорциональны друг другу:

$$N_b^{ГБА} = \left( \frac{N_{НПУиЭ ТС.}^{ГБА} - N_{НПУиЭ ТС.}^{АТСЖ}}{N_{АТСЖ.}} + 1 \right) \cdot N_b^{АТСЖ}, \quad (3)$$

Из приведенных формул следует, что значение количества пожаров, приходящееся на единицу площади защищаемого объекта с ГБА, зависит от количества пожаров топливной системы (ГБО и ЖМТ) и общего количества пожаров на автомобилях. По данным Рисунка 3, с помощью экстраполяционной модели получено значение коэффициента «*b*» для объектов с нахождением ГБА, равное 0,84.

**Метод определения частоты возникновения пожаров** на объектах с хранением и обслуживанием автотранспортных средств, работающих на газомоторном топливе, необходим для использования в расчете индивидуального пожарного риска и заключается:

в получении (использовании) статистических данных о количествах пожаров для автотранспортных средств, работающих на различном топливе, на основании проведенного анализа;

в определении величины «*a*» для автотранспортных средств, работающих на различном топливе;

в проведении анализа по определению количества пожаров и их причинам для автотранспортных средств, работающих на различном топливе;

в составлении зависимости количества пожаров, приходящееся на единицу площади защищаемого объекта с ГБА, от количества пожаров топливной системы (ГБО и ЖМТ) и общего количества пожаров на АТСЖ;

в определении коэффициента «*b*» для объектов с присутствием ГБО;

в определении частоты возникновения пожаров на объектах с хранением и обслуживанием автотранспортных средств, работающих на газомоторном топливе, в зависимости от площади объекта.

В соответствии с предложенным методом определения частоты возникновения пожаров на объектах обслуживания автомобилей, работающих на газомоторном топливе, получены значения, представленные в Таблице 3.

Таблица 3 – Итоговые значения статистических показателей

Статистический показатель	Значение показателя для автомобилей, работающих на жидком топливе		Значение показателя для ГБА
	Расчетные данные	Справочные данные	
a	0,0002666	0,0001200	0,0000574
b	0,86		0,84

В первой главе определена необходимость совершенствования нормативной базы в области обеспечения пожарной безопасности для предприятий по обслуживанию ГБА. Для подтверждения необходимого уровня пожарной опасности с помощью расчета пожарного риска предложен метод определения частоты возникновения пожара, основанный на использовании статистических данных о количествах и площади пожаров для ГБА и количестве ГБА на объекте защиты, который в дальнейшем используется с учетом эффективности работы газоанализаторов.

**Во второй главе «Обоснование мест расстановки газоанализаторов в различных производственных помещениях с присутствием автомобилей, работающих на газомоторном топливе»** рассмотрены аналитические модели формирования газоздушных смесей и предложены методы вычислительной гидродинамики.

Цель лабораторных экспериментов – получение зависимости динамики изменения концентрации газоздушной среды по времени. Полученные зависимости использованы при валидации результатов математического моделирования формирования газоздушной смеси в условиях замкнутого пространства.

В эксперименте проведено изучение истечения пропана в замкнутом помещении из одиночного источника и из багажника автомобиля, при этом рассматривается распространение пропана вверх, вниз, а также обтекание газом корпуса автомобиля (Рисунок 4).

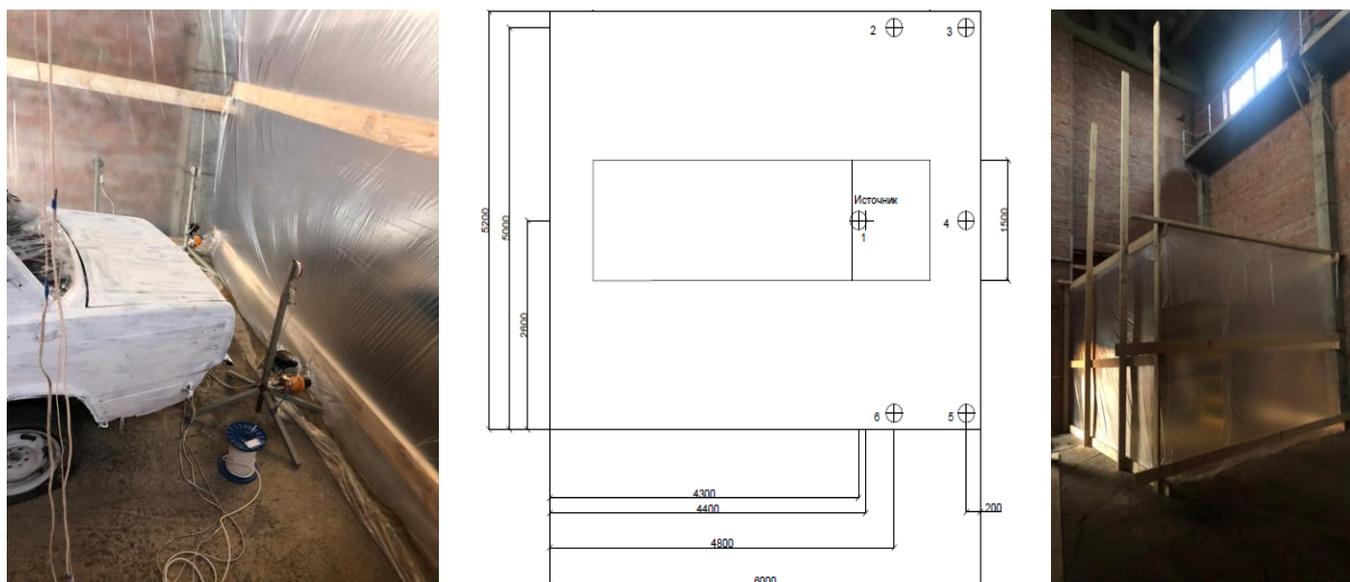


Рисунок 4 – Вид экспериментальной установки с указанием расстановки газоанализаторов

Для имитации помещения станции технического обслуживания на два автомобиля создано испытательное пространство, в котором для получения более точных результатов минимизировано движение воздушной среды. Размеры помещения: 6,0x5,2x3,5 м. Каркас помещения создан из деревянных конструкций, на внутреннюю часть прикреплена полиэтиленовая пленка. По периметру для создания полной изоляции и исключения истечения горючего газа за пределы испытательного помещения полиэтилен обсыпан песком. Утечка газа моделируется в течении 300 секунд, после чего подача газа прекращается. Измерение проводится газоанализаторами марки СГОЭС-2. В каждом эксперименте скорость истечения – 2,8 м<sup>3</sup>/ч. При проведении измерений концентраций пропана температура воздуха составляла +26 °С, влажность воздуха – 24%, атмосферное давление – 738 мм.рт.ст., принудительное проветривание проводилось после каждого эксперимента с контролем достижения нулевой концентрации пропана в помещении. Осредненные результаты экспериментов с истечением пропана в багажнике автомобиля и компьютерного моделирования приведены на Рисунке 5. Рост концентрации пропана продолжался в течении 300 с.

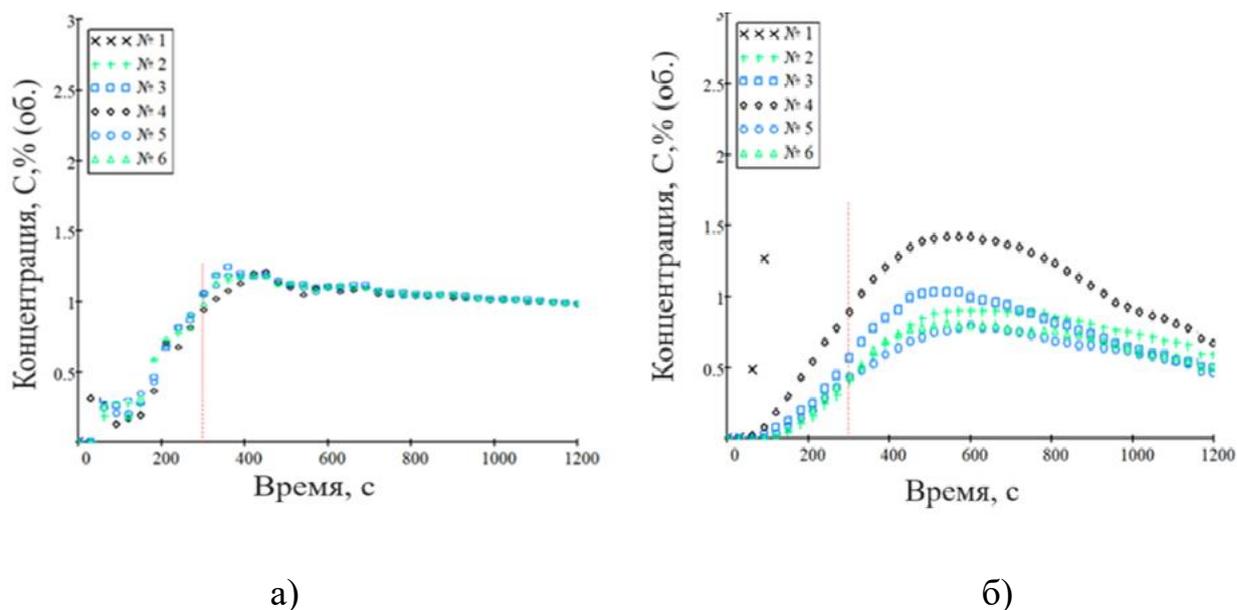


Рисунок 5 – Графики зависимости изменения концентрации пропана от времени и результаты компьютерного моделирования  
 а – результаты компьютерного моделирования, б – результаты эксперимента

Полученные с помощью серии экспериментов значения использовались для оценки достоверности результатов математического моделирования. Численное моделирование характера растекания газа в расчетной области выполнены методом интегрирования усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса.

После обработки полученных при экспериментах результатов по пропану, а также используя результаты, представленные в работе Загуменникова Р.А. по метано-воздушным смесям (Рисунок 6) была проведена валидация с предложенными математическими моделями, используемыми в программном комплексе ANSYS Fluent, со следующими программными пакетами: DesignModeler, Meshing, Fluent (создание геометрических моделей, построение расчетных сеток, математическое моделирование нестационарных процессов, обработка результатов расчетов и выводы полученных данных).

Физическая модель включает в себя конвективное и диффузионное перемешивание пропана с атмосферным воздухом при наличии архимедовых сил. Смесь рассмотрена как идеальная, то есть физические свойства среды определены в соответствии с массовой долей каждой компоненты. Газообразный пропан поступает в расчетную область через трубку со скоростью  $v=2,8$  м/с и температурой  $t=+26^{\circ}\text{C}$ . На поверхности стен и поверхности земли фиксируется нулевой градиент температуры и условий прилипания для скорости (Рисунок 7).

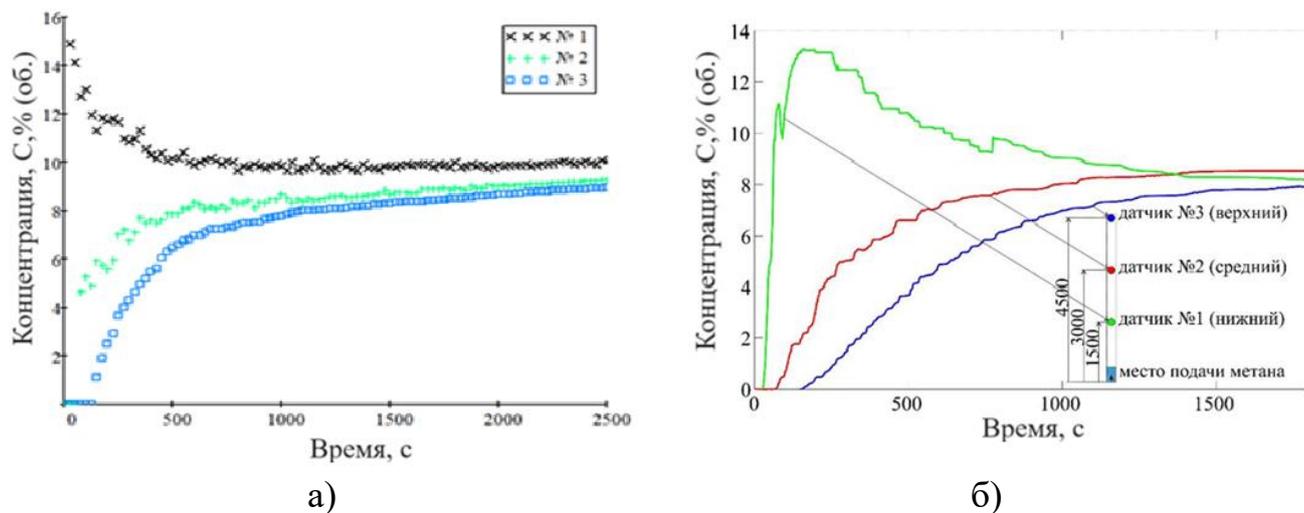


Рисунок 6 – Графики зависимости изменения концентрации метана от времени при эксперименте и результаты компьютерного моделирования:

а – результаты компьютерного моделирования, б – результаты эксперимента  
Загуменникова Р.А.

Для решения задачи прогнозирования распространения газа в помещениях различного объема и определения взрывоопасных концентраций с учетом особенностей геометрического пространства использованы методы, основанные на вычислительной гидродинамике и реализованные в программном комплексе ANSYS Fluent.

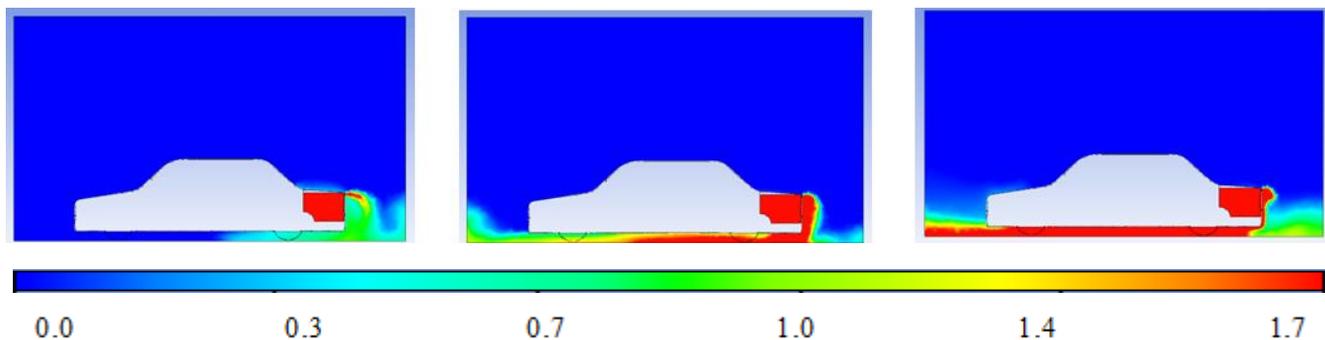


Рисунок 7 – Контуры полей концентрации пропана в центральной плоскости сечения в различные моменты времени 50, 100, 200 с. соответственно

При обработке усредненных результатов экспериментов и результатов компьютерного моделирования средняя погрешность результатов составила 17,5%. Результаты получены при одинаковых условиях, что позволяет провести валидацию математических моделей, используемых в программном комплексе ANSYS Fluent при моделировании поступления пропана в закрытое помещение. На этом основании и с учетом полученных результатов разработано расчетно-

экспериментальное обоснование мест расстановки газоанализаторов в помещениях с наличием ГБА, а также определены значения требуемых параметров расстановки газоанализаторов, которые могут учитываться при расчете индивидуального пожарного риска.

На основании полученных данных проведена оценка технических параметров как самой системы, так и её элементов. Определено значение требуемых параметров расстановки газоанализаторов, которые в дальнейшем используются при определении коэффициента эффективного срабатывания газоанализаторов:

- требуемая высота расстановки газоанализатора  $h_{тр} = 0,2$  м или в соответствии с паспортными данными (при фактическом расположении газоанализатора ниже указанного значения отношение  $h_{тр}$  к  $h_{ф}$  следует принимать равной 1);

- площадь защиты газоанализатором  $S_{пом.} = 80$  м<sup>2</sup> или в соответствии с паспортными данными;

- требуемое количество газоанализаторов  $n_{тр} = [(S_{заб.} - S_{пом.})/S_{пом.}] + 1$ , при этом округление происходит в сторону большей величины ( $S_{пом.} = 80$  м<sup>2</sup> или в соответствии с паспортными данными).

Таким образом, с учетом проведения натурных экспериментов, валидации компьютерной модели, обработки полученных результатов выполнено обоснование мест расстановки газоанализаторов для обнаружения горючих газов. Определены требуемые параметры для оценки эффективности работы газоанализаторов при работе в комплексе с другими техническими средствами обеспечения пожарной безопасности (далее – ТСОПБ) для наиболее частых вариантов развития истечения горючих газов. Указанные параметры используются при расчете пожарного риска для объектов с ГБА.

**В третьей главе «Оценка эффективности газоанализаторов при обеспечении пожарной безопасности объектов обслуживания автомобилей на газомоторном топливе»** описан подход к определению эффективности газоанализаторов (при этом под эффективностью, в соответствии с ISO 9001, понимается соотношение между достигнутым результатом и использованными ресурсами).

В настоящее время одним из численных критериев обоснования обеспечения пожарной безопасности объекта защиты является величина индивидуального пожарного риска (ст. 6, 79, 93 Федерального закона № 123–ФЗ), поэтому достигнутым результатом является полученное значение индивидуального пожарного риска равное  $1 \cdot 10^{-6}$  год<sup>-1</sup> ( $1 \cdot 10^{-4}$  год<sup>-1</sup>).

Важным фактором при определении эффективности применения газоанализаторов является вероятность их эффективного размещения.

$$P_{\text{размещ}} = f\left(\frac{n_{\phi}}{n_{\text{тр}}}, \frac{V_{\text{заб}}}{V_{\text{ном}}}, \frac{h_{\phi}}{h_{\text{тр}}}\right), \quad (4)$$

где  $n_{\phi}$  – фактическое количество газоанализаторов на объекте;

$n_{\text{тр}}$  – требуемое количество газоанализаторов для рассматриваемого объекта;

$V_{\text{заб}}$  – объем помещения, обслуживаемый газоанализатором, м<sup>3</sup>;

$V_{\text{ном}}$  – фактический объем помещения, м<sup>3</sup>;

$h_{\phi}$  – фактическая высота размещения газоанализаторов на объекте, м;

$h_{\text{тр}}$  – требуемая высота размещения газоанализаторов для рассматриваемого объекта, м.

С учетом приведённых выше положений эффективность работы представлена следующим выражением:

$$P_{\Gamma} = e^{-\frac{1}{T_{\text{ср}}}(t_{\text{р}})} \frac{h_{\phi}}{h_{\text{тр}}} \frac{V_{\text{заб}}}{V_{\text{ном}}} \frac{n_{\phi}}{n_{\text{тр}}}, \quad (5)$$

Исходя из численного значения отношения требуемой эффективности газоанализаторов к фактической (формула 4) или (в зависимости от цели расчета) отношения фактического расчетного значения индивидуального пожарного риска ( $R_{\phi}$ ) к безопасному (нормативному) применяется четырехкритериальный подход к оснащению объекта средствами противопожарной защиты, пример которого приведен в Таблице 4.

Таблица 4 – Применение газоанализаторов при обеспечении пожарной безопасности как инициатора иных систем обеспечения пожарной безопасности

Численное значение критерия	Формула для определения величины индивидуального пожарного риска при применении газоанализаторов	Техническое решение
$\frac{R_{\phi}}{R_{\phi_{\text{без}}}} < 24, \text{ при } P_2 = 0,999$ $\frac{R_{\phi}}{R_{\phi_{\text{без}}}} < 17, \text{ при } P_2 = 0,95$ $\frac{R_{\phi}}{R_{\phi_{\text{без}}}} < 12, \text{ при } P_2 = 0,9$ $\frac{R_{\phi}}{R_{\phi_{\text{без}}}} < 7, \text{ при } P_2 = 0,8$	$R_2^{\text{кр}1} = Q_{\text{П}} \cdot q \cdot$ $\cdot (1 - (1 - (1 - D_{\text{СПС}} \cdot P_2) \cdot$ $\cdot (1 - D_{\text{СОУЭ}} \cdot P_2)))$	<p>-при аварийной ситуации из автомобиля начал выходить газ, расставленные газоанализаторы фиксируют повышение концентрации газа и инициируют срабатывание системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре (далее – СОУЭ) (при этом вероятность эффективного срабатывания газоанализаторов и СОУЭ должна учитываться совместно);</p>

Примечание: формулы в Таблице 4 приведены без учета вероятности эвакуации людей ( $P_3$ ) и вероятности эффективной работы технических средств по обеспечению безопасности ( $D_i$ ), применяемые без газоанализатора.

В Таблице 4 приведены численные значения критериев, при которых необходимо применять определенные ТСОПБ совместно с газоанализаторами, в зависимости от вероятности эффективной работы газоанализаторов, но данный подход возможно применять и для определения требуемой вероятности эффективной работы газоанализаторов, т.е. фактически требуемого количества газоанализаторов, их чувствительности, времени наработки на отказ и т.д.

Учет газоанализаторов как средства противопожарной защиты предлагается применять до возникновения пожара (как превентивная мера) - на момент образования горючей среды в помещении. При этом действие иных систем противопожарной защиты предлагается применять как превентивные.

Применение соответствующей системы противопожарной защиты предлагается реализовывать по необходимости в зависимости от фактической

величины индивидуального пожарного риска.

Таким образом, методика повышения уровня пожарной безопасности предприятий по обслуживанию ГБА (Рисунок 8) состоит из:

- использования предложенного комплекса научно-обоснованных требований;
- использования метода оценки эффективности газоанализаторов;
- учета наличия газоанализаторов при обеспечении пожарной безопасности на объектах защиты для снижения величины индивидуального пожарного риска.



Рисунок 8 – Алгоритм методики повышения уровня пожарной безопасности предприятий по обслуживанию ГБА

С учетом проведенных аналитических исследований, натурных испытаний, валидации компьютерной модели предложен алгоритм оценки эффективности газоанализаторов при обеспечении пожарной безопасности объектов обслуживания автомобилей на газомоторном топливе с учетом ранее определенной частоты возникновения пожара на указанных объектах и с учетом необходимых параметров расстановки газоанализаторов и их фактической расстановки. Приведенные результаты и технические решения в совокупности позволяют предложить методику повышения уровня пожарной безопасности предприятий по обслуживанию автотранспортных средств, работающих на газомоторном топливе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе была решена актуальная научная задача обеспечения пожарной безопасности путем повышения эффективности

применения газоанализаторов на объектах хранения и обслуживания автомобилей, оборудованных ГБО:

1. На основании анализа сведений по пожарной опасности автомобилей на газомоторном топливе и действующих требований отечественных и иностранных нормативных документов системы обеспечения пожарной безопасности показана необходимость дальнейшего совершенствования нормативной базы. Для оценки пожарного риска предложен метод определения частоты возникновения пожаров на предприятиях по обслуживанию ГБА посредством расчета коэффициентов «а» и «b», основанных на статистических показателях о количестве пожаров и числе автотранспортных средств. Сформулирован комплекс требований, которые были реализованы в СП 364.1311500.2018 и в изменениях №1 СП 364.311500.2018.

2. Проведено компьютерное моделирование с помощью программного комплекса ANSYS Fluent и экспериментальное исследование процессов истечения горючих газов из автомобилей, оснащенных газобаллонным оборудованием, с получением полей концентрации горючих газов – метана и пропана и обоснованием мест расположения газоанализаторов. Предложен алгоритм оценки эффективности газоанализаторов для расчета пожарных рисков на объектах обслуживания автомобилей на газомоторном топливе с учетом параметров расположения газоанализаторов.

3. Разработана методика повышения уровня пожарной безопасности предприятий по обслуживанию автомобилей на газомоторном топливе, учитывающая комплекс научно-обоснованных требований, особенностей определения частоты возникновения пожара и показателя эффективности работы газоанализаторов при расчете пожарного риска.

#### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:**

**Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:**

1 Простов, Е.Е. Метод оценки эффективности газоанализаторов при обеспечении пожарной безопасности объектов обслуживания автомобилей на газомоторном топливе / Е.Е. Простов // Пожарная безопасность. – 2024. – № 2 (115). – С. 40-49. 0,69 п.л.

2. Простов, Е.Е. Метод определения частоты возникновения пожаров на объектах с хранением и обслуживанием автотранспортных средств, работающих на газомоторном топливе / Е.Е. Простов // Проблемы управления рисками в техносфере. –2023. – № 4 (68). – С. 226-237. 0,6 п.л.

3. Простов, Е.Е. Анализ моделей формирования газоздушных смесей

/ Е.Е. Простов // Пожарная безопасность. – 2023. – № 1. – С. 68-74. 0,46 п.л.

4. Простов, Е.Е. Экспериментальные исследования истечения пропана в закрытом производственном помещении / Е.Е. Простов // Пожарная безопасность. – 2021. – № 4. – С. 25-30. 0,3 п.л.

5. Простов, Е.Е. Определение частоты возникновения пожара в России на транспорте, работающем на КПП и СУГ / Е.Е. Простов, Д.М. Гордиенко, Е.Н. Простов // Пожарная безопасность. – 2021. – № 3. – С. 24-31. 0,4/0,2 п.л.

6. Простов, Е.Е. Анализ пожарной опасности современного автомобильного газобаллонного оборудования / А.Ю. Шебеко, Е.Е. Простов, Д.М. Гордиенко, Е.Н. Простов // Пожарная безопасность. – 2020. – № 4. – С. 102-112. 0,6/0,3 п.л.

7. Простов, Е.Е. Сравнительный анализ требований пожарной безопасности к предприятиям по обслуживанию и хранению автомобилей на газомоторном топливе / А.Ю. Шебеко, Е.Е. Простов, Д.М. Гордиенко, В.П. Молчанов // Пожарная безопасность. – 2019. – № 4. С. 78-86. 0,6/0,2 п.л.

8. Простов, Е.Е. Основные положения отечественных и зарубежных нормативных документов, регламентирующих требования пожарной безопасности к предприятиям по обслуживанию автомобилей на газомоторном топливе / Е.Е. Простов, А.Ю. Шебеко, Д.М. Гордиенко, В.В. Ильичев // Пожарная безопасность. – 2019. – № 1. – С. 77-84. 0,4/0,15 п.л.

9. Простов, Е.Е. Методология разработки требований пожарной безопасности к предприятиям по обслуживанию и хранению автомобилей на газомоторном топливе на основе риск-ориентированного подхода / А.Ю. Шебеко, Е.Е. Простов, Д.М. Гордиенко, В.А. Зуйков // Пожарная безопасность. – 2018. – № 1. – С. 64-69. 0,4/0,15 п.л.

10. Простов, Е.Е. Обзор характерных аварий с пожарами и взрывами на объектах с обращением газомоторного топлива / А.Ю. Шебеко, Е.Е. Простов, Д.М. Гордиенко, С.С. Воевода // Пожарная безопасность. – 2018. – № 2. – С. 84-89. 0,4/0,15 п.л.

**Публикации в иных изданиях (доклады на научно-практических конференциях):**

11. Простов, Е.Е. Изучение истечения пропана в закрытом помещении и в багажнике легкового автомобиля / Е.Е. Простов, Е.Н. Простов, В.А. Зуйков, Н.В. Кондратюк, А.В. Зуйков // Актуальные проблемы пожарной безопасности материалы XXXV Международной научно-практической конференции. – 2023. – С. 522-528. 0,4/0,2 п.л.

12. Простов, Е.Е. Средства автоматического пожаротушения газобаллонных автомобилей / В.А. Зуйков, А.В. Зуйков, Е.С. Трещин, Е.Н. Простов, Е.Е. Простов

// Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXIV научно-практической конференции, посвященной 85-летию образования ФГБУ ВНИИПО МЧС России. – 2022. – С. 237-240. 0,2/0,1 п.л.

13. Простов, Е.Е. Пожароопасность газобаллонных автомобилей /Е.Е. Простов, В.А. Зуйков, Г.Т. Земский, А.В. Зуйков, Н.В. Кондратюк //Актуальные проблемы пожарной безопасности материалы XXXIV научно-практической конференции, посвященной 85-летию образования ФГБУ ВНИИПО МЧС России. – 2022. – С. 570-574. 0,23/0,1 п.л.

14. Простов, Е.Е. Обзор используемых альтернативных моторных топлив / Д.М. Гордиенко, Г.Т. Земский, Е.Н. Простов, Е.Е. Простов, Н.В. Кондратюк //Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXII Международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 600-603. 0,2/0,1п.л.

15. Простов, Е.Е. Основные отличия нормативных требований пожарной безопасности к предприятиям по обслуживанию и хранению автомобилей на газомоторном топливе в отечественных и зарубежных документах / Д.М. Гордиенко, В.А. Зуйков, Г.Т. Земский, Е.Н. Простов, Е.Е. Простов // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXII Международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 617-621. 0,23/0,1п.л.

16. Простов, Е.Е. Особенности пожарной безопасности зданий с присутствием автомобилей на газовом топливе / В.А. Зуйков, Е.Н. Простов, Е.Е. Простов, Н.В. Кондратюк, Д.В. Долгих //Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXII Международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 622-626. 0,23/0,1 п.л.

Подписано в печать  
Печать цифровая

06.09.2024  
Объем 1 п.л.

Формат 60×84 1/16  
Тираж 100 экз.

---

Отпечатано в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России  
196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149