

На правах рукописи

Акимова Александра Борисовна

**МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
АВТОСТОЯНОК ЗАКРЫТОГО ТИПА**

2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

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

Научный руководитель:

Моторыгин Юрий Дмитриевич

доктор технических наук, профессор, заслуженный
работник высшей школы Российской Федерации

Официальные оппоненты:

Хасанов Ирек Равильевич

доктор технических наук, ФГБУ «Всероссийский
ордена «Знак Почета» научно-исследовательский
институт противопожарной обороны Министерства
Российской Федерации по делам гражданской
обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации
последствий стихийных бедствий», главный научный
сотрудник

Савельев Анатолий Петрович

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет им. Н.П.
Огарёва», кафедра безопасности жизнедеятельности

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет»

Защита состоится 14 марта 2024 года в 15.00 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 Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 149) и на сайте <https://dsomet.igps.ru>.

Автореферат разослан «__» декабря 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 04.2.003.01
кандидат технических наук, доцент

М.Р. Сытдыков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Автостоянки закрытого типа являются широко распространенными элементами городской инфраструктуры и обеспечивают нормальное функционирование современных транспортных систем. Современные автостоянки должны отвечать установленным законодательством требованиям пожарной безопасности. Одной из проблем обеспечения безопасности на них является увеличение доли обслуживаемых автомобилей на альтернативных источниках энергии, например, электромобилей. Этим обусловлена необходимость разработки новых методов обеспечения защиты людей от опасных факторов пожара (ОФП) на автостоянках закрытого типа.

Статистические данные по пожарам в России показывают, что пожары транспортных средств занимают второе место после пожаров в жилом секторе. Возгорания на закрытых автостоянках осложняются сосредоточением большого количества автомобилей в замкнутом помещении, расположением автостоянок на территории зданий иного функционального назначения (торговые центры, офисные здания и т.д.), а также особенностями пожарной нагрузки автомобилей. Вариативность пожарной нагрузки обусловлена расположением на автостоянках автомобилей на альтернативных источниках энергии, содержащих вещества и материалы, не характерные для автомобилей, оснащенных двигателями внутреннего сгорания (ДВС) – например, силовая установка электромобилей включает в себя литий-ионные аккумуляторы, склонные к самовозгоранию, а также к интенсивному горению с высокой вероятностью взрыва.

Реализуемые в настоящее время технические решения по обеспечению пожарной безопасности стоянок автомобилей закрытого типа не в полной мере учитывают специфику обеспечения пожарной безопасности с учетом хранения автомобилей на альтернативных источниках энергии, например, электромобилей. В связи с этим актуальной **научной задачей** является расширение методической базы обеспечения пожарной безопасности автостоянок закрытого типа для учёта вариативности пожарной нагрузки при размещении автомобилей на альтернативных источниках энергии. Для решения данной научной задачи выделено несколько подзадач:

разработать информационную модель, основанную на декомпозиции факторов, влияющих на развитие процесса горения на автостоянках закрытого типа;

разработать динамическую модель пожаров автотранспортных средств на автостоянках закрытого типа;

разработать методику обеспечения пожарной безопасности автостоянок закрытого типа с учетом вариативной пожарной нагрузки.

Степень разработанности темы исследования. Исследованием и оценкой пожарной безопасности автостоянок, моделированием возникновения и развития опасных факторов пожара, возникающих на объектах хранения легкового автотранспорта, занимались отечественные исследователи Зайцев В. В., Зуев С. А., Карпов А. В., Литовченко И. О., Королев Д. С., Орлов О. И., Таранцев А. А., Виноградов Д. В., Хасанов И. Р., Аксенов С. Г., Савельев А. П., Галишев М. А.

Необходимо отметить, что в большинстве случаев ранее проведенные исследования пожарной безопасности автостоянок не учитывают пожарную нагрузку современных автомобилей на альтернативных источниках энергии. В связи с этим существует необходимость разработки методики, позволяющей оценить пожарную опасность закрытых автостоянок с учетом размещения на них автомобилей на альтернативных источниках энергии на основе динамической модели пожаров автотранспортных средств.

Цель работы – повышение уровня пожарной безопасности автостоянок закрытого типа путем совершенствования методического обеспечения оценки вариативной пожарной нагрузки.

Объект исследования – автостоянки закрытого типа.

Предмет исследования – влияние пожарной нагрузки автомобилей на альтернативных источниках энергии на развитие опасных факторов пожара.

Научная новизна. При разработке информационной модели ранжирован ряд факторов, оказывающих влияние на развитие процесса горения на автостоянках закрытого типа с учетом вариативной пожарной нагрузки.

Предложена динамическая модель пожаров автотранспортных средств на автостоянках закрытого типа, учитывающая эффективность действия средства тушения горящих электромобилей на основе базальтовой сетки.

Предложена методика обеспечения пожарной безопасности автостоянок закрытого типа, отличающаяся от известных наличием инструментария для оценки пожарной нагрузки автотранспортных средств на альтернативных источниках энергии.

Теоретическая значимость результатов заключается в расширении возможностей известных компьютерных методов моделирования пожаров, а именно:

информационная модель позволяет учитывать влияние факторов, связанных с расположением пожарной нагрузки, а также с применением новых средств тушения; дополнена экспериментальная база определения параметров горения материалов, используемых в современных автомобилях, для моделирования развития ОФП на автостоянках закрытого типа;

экспериментально определен коэффициент эффективного срабатывания средства тушения на основе базальтовой сетки, применимого для локализации и тушения очага пожара при горении литий-ионных аккумуляторов.

Практическая значимость результатов:

разработанная информационная модель позволяет исследовать сценарии развития пожара на автостоянках закрытого типа для различных вариантов расположения пожарной нагрузки;

динамическая модель пожаров автотранспортных средств позволяет повысить точность расчетов пожарного риска для автостоянок закрытого типа за счет использования экспериментальных данных о параметрах горения материалов, используемых в современных автомобилях;

полученные в результате исследования экспериментальные данные о специфике горения пожарной нагрузки электромобилей, а также проведенный анализ температурных характеристик материалов пожарной нагрузки автомобилей повышают объективность и доказательную силу компьютерных моделей развития пожара.

Методика может быть использована для повышения точности расчетов пожарных рисков автостоянок закрытого типа с учетом размещения на них электромобилей.

Методы исследования: математическое моделирование, системный анализ, эмпирические научные методы, сравнительный анализ, термогравиметрический анализ.

Достоверность научных результатов обеспечена применением общенаучных методов, математической обработкой результатов экспериментов в соответствии с положениями действующих ГОСТов, использованием современного пакета сертифицированных прикладных программ FDS.

Положения, выносимые на защиту.

1. Информационная модель, основанная на декомпозиции факторов, влияющих на развитие процесса горения на автостоянках закрытого типа.

2. Динамическая модель пожаров автотранспортных средств на автостоянках закрытого типа.

3. Методика обеспечения пожарной безопасности автостоянок закрытого типа с учетом вариативной пожарной нагрузки.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует п. 9 «Разработка научных основ, моделей и методов исследования процессов распространения опасных факторов пожара по объектам защиты» и п. 14 «Исследование условий, разработка и совершенствование методов оценки и способов снижения пожарных рисков на объектах защиты и прилегающих к ним территориях» паспорта специальности 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки).

Реализация результатов исследования. Результаты исследования внедрены в практическую деятельность ФГБУ «Судебно-экспертное учреждение федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория по

г. Санкт-Петербургу» и «Исследовательского центра экспертизы пожаров» научно-исследовательского института перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности.

Апробация исследований. Научные результаты публиковались в материалах российских и международных конференций: Международной научно-практической конференции «Комплексные проблемы техносферной безопасности» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2018 г; Международной научно-практической конференции, «Транспорт России проблемы и перспективы», 13-14 ноября 2018 г., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России; VII Всероссийской с международным участием научно-практической конференции «Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий ЧС», 20-21 декабря 2018 г. Воронежский институт; XV Международной научно-практической конференции «Комплексные проблемы техносферной безопасности», март 2019, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019», 8-12 апреля 2019 г., МГУ; XI Всероссийской научно-практической конференции «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Современные методы и технологии предупреждения и профилактики возникновения чрезвычайных ситуаций», Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2019 г; Международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы – 2019», Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН. 2019 г.

Публикации. Научные результаты изложены в 16 научных публикациях, 6 из которых – в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, получен патент на полезную модель.

Личный вклад автора. В совместных публикациях основные научные результаты исследования получены автором лично. Автором предложена информационная модель, основанная на декомпозиции факторов, влияющих на развитие процесса горения на автостоянках закрытого типа, динамическая модель пожаров автотранспортных средств на автостоянках закрытого типа, методика обеспечения пожарной безопасности автостоянок закрытого типа с учетом вариативной пожарной нагрузки.

Структура, объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Содержание работы изложено на 125 страницах текста, список использованной литературы включает в себя 108 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы исследования, определена степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, определены методы исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведена степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе «Декомпозиция факторов, влияющих на развитие горения автотранспортных средств на закрытых автостоянках» предложена информационная модель, основанная на декомпозиции факторов, влияющих на развитие процесса горения на автостоянках закрытого типа, рассмотрена классификация мест хранения автотранспорта с учетом пожарной безопасности, отражены статистические данные по пожарам на автостоянках, представлен обзор пожаров на открытых и закрытых местах хранения автомобильного транспорта, проанализирована нормативно-правовая база обеспечения пожарной безопасности автостоянок закрытого типа в России и за рубежом.

Анализ статистических данных показал, что в помещениях закрытых автостоянок по всему миру растёт количество пожаров с участием электромобилей, зачастую со смертельными исходами. Необходимо разработать информационную модель, которая будет учитывать все факторы, влияющие на распространение пожара, и позволит проанализировать возможные пожароопасные ситуации и усовершенствовать нормы и требования пожарной безопасности в условиях увеличения доли хранящихся автомобилей на альтернативных источниках энергии, характеризующихся повышенной пожарной опасностью.

В настоящей работе предложена информационная модель, основанная на декомпозиции факторов, влияющих на развитие процесса горения на автостоянках закрытого типа, разработанная с применением статистических и экспериментальных методов. Факторы, связанные с расположением автомобилей относительно друг друга и расстоянием между ними, выделены в отдельную группу, поскольку от них зависит скорость распространения пожара на закрытой автостоянке. Так, скорость распространения пожара от одного транспортного средства до другого при их взаиморасположении боковыми частями относительно друг друга составляет от 10 до 20 минут, при расположении автомобилей «капот к капоту» – 5 минут. Данные факторы должны быть учтены при выборе наиболее неблагоприятного сценария возникновения пожара на автостоянках закрытого типа для оценки пожарного риска. Факторы, связанные с характеристиками автостоянки – её габаритами и количеством пожарной нагрузки, – влияют на скорость роста температуры, максимальные и минимальные значения температуры, интенсивность и продолжительность пожара. Фактор использования системы пожаротушения оценивается путем анализа таких параметров, как расположение автостоянки, этажность, средняя наполняемость автостоянки др. Применение системы

автоматического пожаротушения на автостоянках закрытого типа снижает величину пожарных рисков, однако существуют ситуации, когда работа автоматических установок пожаротушения на территории закрытых автостоянок не обеспечивает локализации и полной ликвидации пожара. Несмотря на то, что распространение пожара можно предотвратить путем применения систем пожаротушения, следует учитывать опасность, которую представляют электромобили на литий-ионных аккумуляторах. В результате исследования статистико-эмпирических данных, а также проведения экспериментов были определены наиболее значимые факторы, которые необходимо учитывать при моделировании развития пожара на современных автостоянках закрытого типа (Рисунок 1). Вновь введенные факторы ранжированы от наименее к наиболее значимым.

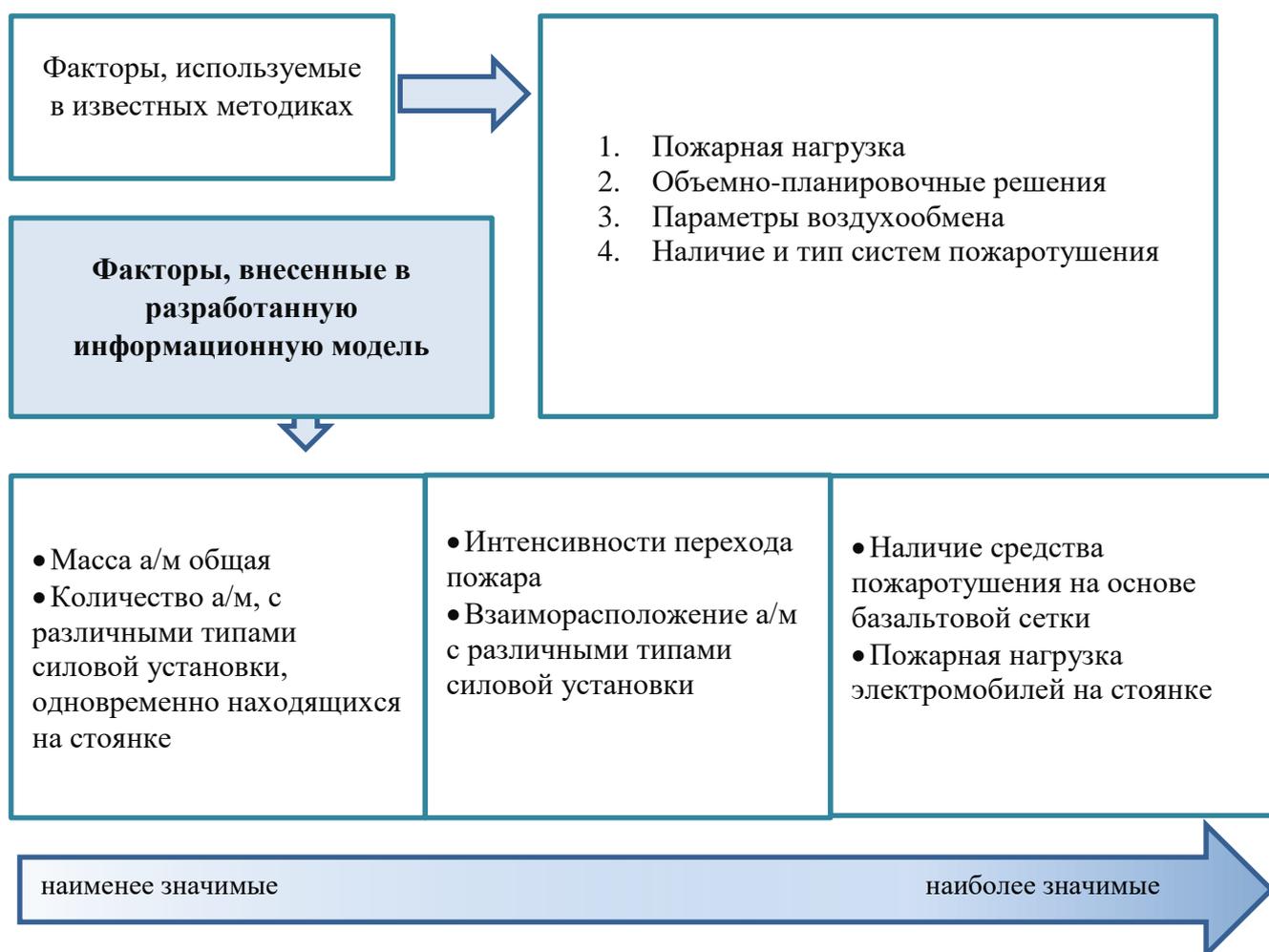


Рисунок 1 – Факторы, влияющие на развитие процесса горения на автостоянках закрытого типа

На основе декомпозиции и ранжирования факторов, влияющих на развитие процесса горения на автостоянках закрытого типа, разработана информационная модель (Рисунок 2). Данная модель использована для расчета пожарного риска в программном комплексе Pyrosim.

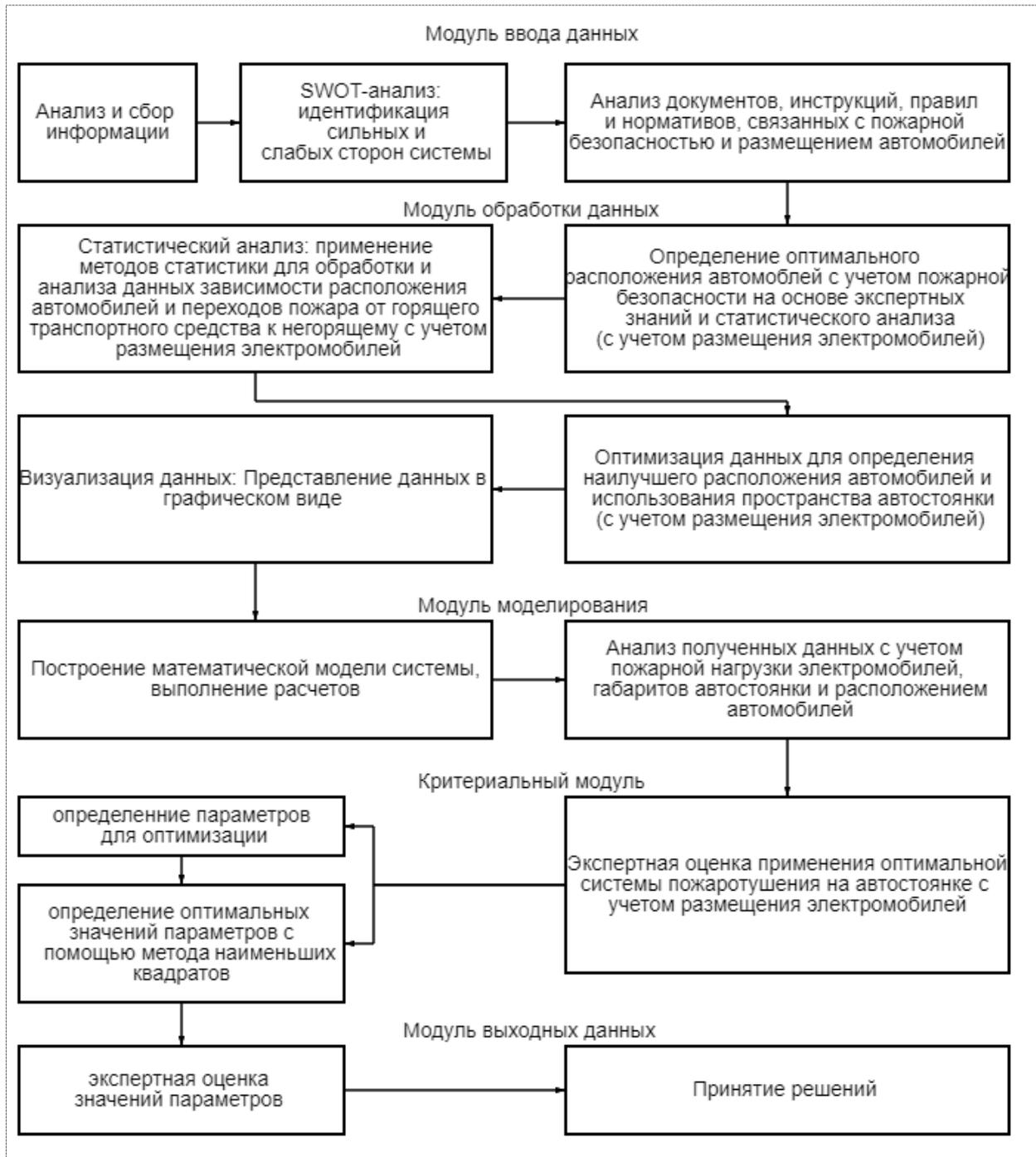


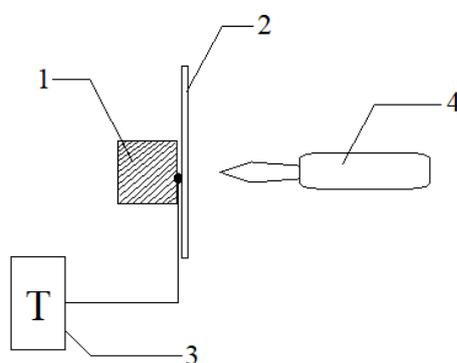
Рисунок 2 – Структурная схема информационной модели, основанная на декомпозиции факторов, влияющих на развитие процесса горения на автостоянках закрытого типа

Предложенная информационная модель позволит исследовать сценарии развития пожара на автостоянках закрытого типа для различных вариантов расположения пожарной нагрузки, повышая точность моделирования пожароопасных ситуаций, возникающих на автостоянках закрытого типа, а также предлагать новые решения, которые позволят предотвратить распространение пожаров.

Во второй главе «Моделирование динамики пожаров автотранспортных средств на автостоянках закрытого типа» проведено экспериментальное обоснование параметров моделирования развития пожара, построен граф состояний марковской цепи пожароопасной ситуации на автостоянке закрытого типа, определена пожарная нагрузка электромобилей, разработана динамическая модель пожаров автотранспортных средств на автостоянках закрытого типа.

В главе отражены способы, позволяющие оценить интенсивности переходов пожара от горящего объекта к не горящим, а также определены характеристики материалов, необходимые для дальнейшего использования при моделировании пожаров в Pyrosim.

Проведено моделирование теплового воздействия на пожарную нагрузку автомобиля для исследования процесса перехода пожара от горящего транспортного средства на материалы соседнего автомобиля. Для эксперимента использовали установку, состоящую из металлического корпуса цилиндрической формы, покрытого изнутри волокнистым материалом, имитирующим внутреннюю отделку салона (Рисунок 3). Воздействие пожара на металлический корпус установки имитировали с помощью газовой горелки. Визуально фиксировали момент возникновения пламенного горения материала образцов и показания мультиметра на холодном спаяе термоэлектрического преобразователя в этот момент.



- 1 – исследуемый материал; 2 – металлическая пластина;
3 – мультиметр, термопара; 4 – газовая горелка

Рисунок 3 – Установка для определения времени возникновения пламенного горения материалов

Температура возникновения пламенного горения образцов материалов внутренней отделки автомобилей определена также с помощью термогравиметрического (ТГ) исследования и ДСК-анализа (дифференциальная сканирующая калориметрия). Измерения проводили для трёх материалов: резина, поролон, ПВХ, а также для пробы материалов литий-ионного аккумулятора с использованием прибора (СТА) NETZSCH STA 449 F3 Jupiter.

С помощью рассмотренных выше методов получены схожие результаты значений температуры возникновения пламенного горения исследуемых образцов (Таблица 1). Эти значения совпадают со справочными данными по температурам самовоспламенения материалов с погрешностью 15-20%, что позволяет сделать вывод о возможности применения данных методов для оценки потенциального риска возникновения пламенного горения материалов, составляющих пожарную нагрузку современных автомобилей.

Таблица 1 – Результаты ДСК и ТГ (ДТГ) образцов

Материал, марка	Температура самовоспламенения, °С (справочные данные)	Интервал максимального тепловыделения (ДСК), °С	Интервал максимальной потери массы (ТГ), °С	Экспериментальная температура возникновения пламенного горения, °С (установка, рисунок 2)
Пенополиуретан ST1828	450	281...549	271...525	370
Резина Искусственный каучук	395	398...568	368...565	375
ПВХ	454	380...575	382...554	410
Литий-ионный аккумулятор (внутренние слои) ICR18650	Не определена	45...310	137...226	220

Полученные значения температур использованы при оценке интенсивностей перехода пожара из одного состояния в другое для рассматриваемой системы, а также при моделировании пожара автомобилей на альтернативных источниках энергии в программном комплексе Pyrosim. Значение температуры возникновения пламенного горения для материала обратно пропорционально интенсивности перехода пожара на автомобиль, содержащий данный материал.

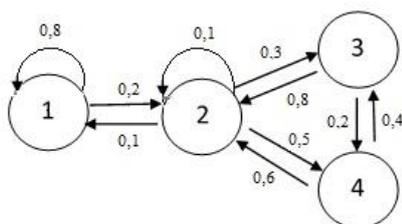
Рассмотрен способ прогнозирования процесса перехода пожара из одного состояния в другое для марковской цепи пожароопасной ситуации на автостоянке закрытого типа. Параметры марковской модели могут быть определены экспериментально или с помощью иных методов оценки. В настоящей работе применены экспертный и статистический методы.

Статистический метод основан на оценке пожароопасных ситуаций, произошедших на автостоянках закрытого типа ранее (Таблица 2). Путем анализа возгораний электромобилей, автомобилей на бензиновом двигателе, оценивались интенсивности переходов системы из одного состояния в другое.

Таблица 2 – Статистические данные о переходах пожаров при горении автомобилей с разными типами силовой установки

Расположение очага пожара	Число пожаров	Количество переходов пожара на электромобиль / % от общего количества рассмотренных пожаров	Количество переходов пожара на автомобиль с бензиновым двигателем / % от общего количества рассмотренных пожаров
Электромобиль	58	2 / 3,4	23 / 39,7
Автомобиль с бензиновым двигателем	147	29 / 19,7	46 / 31,3

Как видно из Таблицы 2, горение от электромобиля переходит на автомобиль на бензиновом двигателе приблизительно в 40% случаях; наоборот – приблизительно в 20% случаях. На основе данных Таблицы 2 и экспертной оценки были определены интенсивности перехода пожара для графа состояний марковской цепи (Рисунок 4).



1 – нормальное функционирование автостоянки; 2 – пожар; 3 – горение автомобиля на бензиновом двигателе; 4 – горение электромобиля

Рисунок 4 – Граф состояний марковской цепи пожароопасной ситуации на автостоянке закрытого типа

В начальный момент времени $t = 0$: (собственный вектор) будет иметь вид:

$$P_1(0) = 1$$

$$P_2(0) = 0$$

$$P_3(0) = 0$$

$$P_4(0) = 0$$

Систему можно описать в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1(t)}{dt} = P_2 \cdot 0,1(t) - P_1 \cdot 0,2(t) \quad (1) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = P_1 \cdot 0,2(t) + P_3 \cdot 0,8(t) + P_4 \cdot 0,6(t) - P_2 \cdot 0,9(t) \quad (2) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = P_2 \cdot 0,3(t) + P_4 \cdot 0,4(t) - P_3(t) \quad (3) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = P_2 \cdot 0,5(t) + P_3 \cdot 0,2(t) - P_4(t) \quad (4) \end{array} \right.$$

Определены финальные вероятности для рассматриваемой системы:

$$x_1 = 0,19$$

$$x_2 = 0,38$$

$$x_3 = 0,20$$

$$x_4 = 0,23$$

На Рисунке 5 представлены графики решений дифференциальных уравнений (1) - (4).

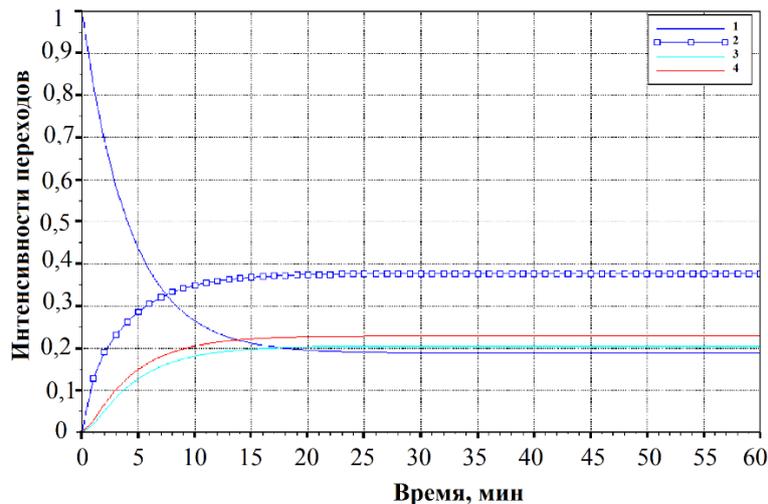
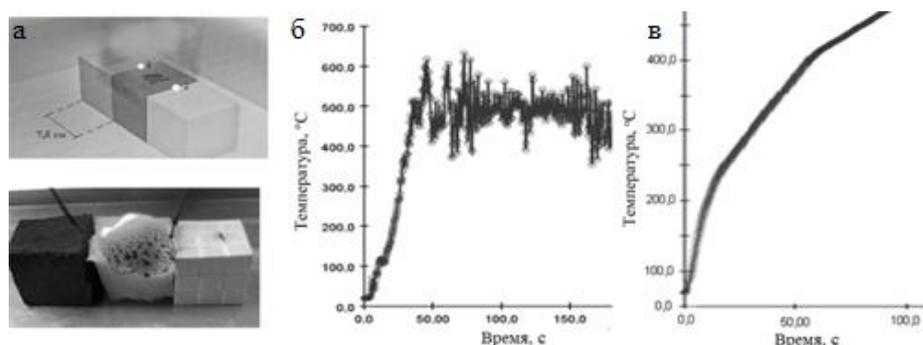


Рисунок 5 – Графики изменения значений решения дифференциальных уравнений (1) - (4)

Анализируя финальные значения вероятностей, можно сделать вывод, что на автостоянках закрытого типа с учетом расположения электромобилей необходимо применение дополнительных технических решений. Это позволит минимизировать пожарные риски, а при возникновении пожара предотвратить его переход на соседние транспортные средства. В существующих программных комплексах существуют базы данных стандартных элементов конструкций. Зачастую этих

данных недостаточно для того, чтобы достаточно точно описать моделируемые процессы.

При моделировании пожара объекта, состоящего из большого количества элементов, целесообразно разделить этот объект на простые составные части по материалам, составляющим пожарную нагрузку. На основе этого принципа исследовали процесс перехода пожара между кубическими модулями из разных материалов – резина, пенополиуретан, ПВХ. Проводили натурные эксперименты, отражающие переход возгорания с одного материала на другой, а также моделирование аналогичных процессов в программе Pyrosim (Рисунок 6).



а – схема расположения кубических модулей при натурных испытаниях;
б и в – графики изменения температуры модулей из резины и ПВХ соответственно, полученные путем компьютерного моделирования.

Рисунок 6 – Исследование процессов перехода горения между материалами, составляющими пожарную нагрузку автомобиля

Оценивали время перехода пожара с одного модуля на другой, а также время, за которое пожар распространится по всей поверхности составного объекта. Результаты компьютерного моделирования и натурных испытаний имеют схожие тренды изменения температуры модулей, что говорит об адекватности используемой модели.

Для оценки различий пожарной нагрузки электромобиля и автомобиля с ДВС был проанализирован состав типового литий-ионного аккумулятора типоразмера 18650 (Рисунок 7), из которых состоит аккумуляторная батарея электромобиля. Полная масса аккумулятора составляет 95 г.

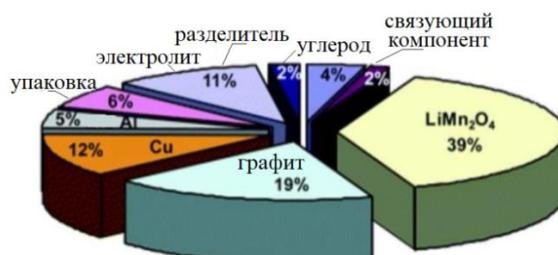


Рисунок 7 – Массовый состав литий-ионного аккумулятора 18650, %_{масс.}

Экспериментально были определены удельная массовая скорость выгорания, линейная скорость распространения пламени, длительность горения аккумулятора. Исследованы реакции горения для каждого элемента аккумулятора, определены низшая теплота сгорания и максимальная удельная скорость тепловыделения, рассчитана общая пожарная нагрузка литий-ионного аккумулятора. Полученные данные о пожарной нагрузке были преобразованы для программного комплекса Pyrosim (Таблицы 3 и 4).

Таблица 3 – Пожарная нагрузка литий-ионного аккумулятора 18650 для расчетов в программе Pyrosim (простая стехиометрия)

Параметр	Справочные данные					Данные для PyroSim					
	Hf	Dm	L O ₂	L CO ₂	L CO	Hf	X	Y	Z	Ys	Y CO
Единица измерения	Мдж/кг	Нп·м ² /кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг	Мдж/кг				кг/кг	кг/кг
Значение	17,625	890	1,030	0,921	0	17,625	3,155	11,632	3,473	0,102	0

Таблица 4 – Пожарная нагрузка автомобиля с ДВС и электромобиля, рассчитанная на основе вариативной пожарной нагрузки (сложная стехиометрия)

Пожарная нагрузка	Данные для PyroSim							
	Hf, Мдж/кг	v C, моль	v O ₂ , моль	v CO ₂ , моль	v CO, моль	v HCL, моль	v H ₂ O, моль	v N ₂ , моль
Автомобиль с ДВС	31,700	0,534	8,596	3,066	0,360	0,031	12,614	32,338
Бензобак	12,960	0,078	3,102	1,934	0,182	0	2,072	11,672
Литий-ионный аккумулятор	17,625	0,976	3,350	2,179	0	0	5,816	0
Электромобиль	36,365	1,432	8,844	3,311	0,178	0,031	16,358	20,666

Приведенные выше сведения были учтены при моделировании пожаров электромобилей на автостоянках закрытого типа при расчете рисков.

В третьей главе «Методика обеспечения пожарной безопасности на автостоянках закрытого типа» представлена модель автостоянки закрытого типа с учетом размещения автомобилей на альтернативных источниках энергии. Проведено моделирование развития ОФП с применением элементов системы противопожарной защиты, в частности средства пожаротушения на основе базальтовой сетки. Расчёт проведен на примере закрытой автостоянки, расположенной в здании иного функционального назначения (торгового центра). Рассмотрены два типа автомобилей – на бензиновом двигателе и электромобили.

Параметры автомобилей при моделировании распространения пламени по поверхности материалов транспортных средств дополнены температурными значениями, определенными методами термического анализа.

При помощи программ Pyrosim, Pathfinder и FireRisk были рассчитаны пожарные риски для рассматриваемой автостоянки. При расчете рисков была учтена измененная пожарная нагрузка электромобилей с учетом наличия литий-ионных аккумуляторов. В сценарии проведен расчет для наибольшего количества людей, находящихся одновременно в здании объекта. В качестве фактора, осложняющего обстановку при пожаре, принято блокирование огнем одного из эвакуационных выходов. В результате расчета установлено, что использование стандартных технических решений не обеспечивает требуемые значения пожарного риска для рассматриваемой автостоянки. Таким образом, необходима разработка дополнительных технических решений, способствующих локализации пожара для защиты отдельных транспортных средства, припаркованных на автостоянках.

Проведены натурные огневые испытания по определению огнетушащего эффекта применения базальтовой сетки при пожаре электромобиля. Экспериментально доказано, что базальтовая сетка способна обеспечить локализацию очага пожара и воспрепятствовать дальнейшему распространения огня на соседние транспортные средства (Рисунок 8). Также в результате экспериментов было установлено, что базальтовая сетка, располагаясь между оросителем и очагом пожара, не препятствует его успешному тушению (Рисунок 9).



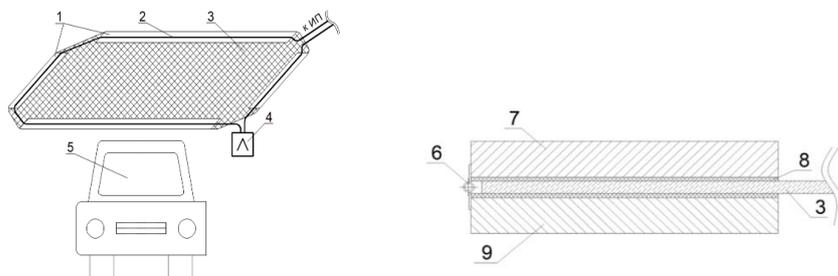
Рисунок 8 – Локализация пожара базальтовой сеткой

На основании проведенных экспериментов определен коэффициент эффективного срабатывания (выполнения задачи) технического средства. Успешно локализовать пожар с помощью базальтовой сетки удалось в 67% случаев.



Рисунок 9 – Моделирование работы системы водяного пожаротушения при подаче воды сквозь базальтовую сетку

Разработано и запатентовано (патент РФ RU 217399) средство тушения на основе базальтовой сетки (Рисунок 10). Решение отличается наличием системы сброса на очаг возгорания, включающей в себя датчик пламени и магнитные держатели, расположенных по периметру базальтовой сетки и удерживающих его с помощью магнитных прижимных пластин.



- 1 – магнитные держатели; 2 – цепь питания электромагнитов; 3 – базальтовая сетка;
 4 – датчик пламени; 5 – автомобиль; 6 – петли прижимной пластины;
 7 – электромагнит; 8 – прокладка; 9 – прижимная пластина, ИП – источник питания

Рисунок 10 – Средство тушения на основе базальтовой сетки

На основании экспериментальных данных предложено ввести при программном моделировании дополнительный коэффициент эффективного срабатывания (выполнения задачи) предложенного технического средства, равный 0,67.

Этот коэффициент возможно учитывать при расчете пожарного риска для автостоянок закрытого типа, с техническим обслуживанием и ремонтом, для формулы определения вероятности D эффективной работы технических средств по обеспечению пожарной безопасности i -го помещения при реализации j -го сценария пожара. С учетом предложенного коэффициента формула имеет вид:

$$D_{ij} = 1 - \frac{K}{k-1} (1 - 0,67) \quad (5)$$

где K – число технических средств противопожарной защиты; 0,67 – коэффициент эффективного срабатывания (выполнения задачи) k -го технического средства при j -ом сценарии пожара для i -го помещения здания.

В программном комплексе Pyrosim был смоделирован пожар на автостоянке закрытого типа с учетом применения базальтовых сеток над машиноместами и базальтовых перегородок между ними. Для прочих элементов системы противопожарной защиты были заданы нормативные параметры. При помощи программ FireRisk и Pathfinder был рассчитан индивидуальный пожарный риск (Таблица 5). Результаты экспериментов и расчета пожарного риска показывают

целесообразность использования средства тушения пожаров на основе базальтовых сеток на автостоянках закрытого типа.

Таблица 5 – Расчетная величина индивидуального пожарного риска

Расчетная величина индивидуального пожарного риска	Значение
Расчетная величина индивидуального пожарного риска без учета базальтовых сеток и перегородок	$5,85 \cdot 10^{-4}$
Расчетная величина индивидуального пожарного риска с учетом базальтовых сеток и перегородок	$5,80 \cdot 10^{-7}$

На основе результатов проведенных экспериментов и компьютерного моделирования разработана Методика обеспечения пожарной безопасности автостоянок закрытого типа с учетом вариативной пожарной нагрузки.

В ходе реализации методики проводят экспертную оценку автостоянки закрытого типа с целью определения исходных данных для моделирования пожара. Исходные данные включают в себя геометрические параметры автостоянки, количество машиномест, расположение эвакуационных выходов, расположение автостоянки (отдельно стоящая или находится в здании иного функционального назначения), характеристики системы противопожарной защиты, а также оценку горючей нагрузки расположенных на автостоянке автомобилей в зависимости от типа силовой установки.

Первый этап включает в себя осмотр автостоянки закрытого типа; прогнозирование возможных сценариев пожароопасных ситуаций; оценку горючей нагрузки автомобилей, расположенных на автостоянке; построение графа состояний марковской цепи пожароопасной ситуации на автостоянке, а также определение предельных вероятностей состояний для рассматриваемой системы.

На втором этапе определяют характер взаиморасположения автомобилей на автостоянке и тип силовой установки электромобилей. Проводят расчет пожарного риска с учетом горючей нагрузки.

На третьем этапе оценивают величину пожарного риска. В случае, если его значение превышает допустимое, для рассматриваемой автостоянки разрабатывают систему дополнительных технических средств противопожарной защиты.

Четвёртый этап включает в себя оценку экономической эффективности вводимых технических средств. Если экономическая целесообразность обеспечивается, проводят расчет пожарного риска с учетом введенных технических средств противопожарной защиты. В случае превышения им допустимого значения повторяют этапы 3 и 4 необходимое количество раз до снижения значения пожарного риска ниже допустимого.

Методика позволяет оценить пожарный риск для закрытой автостоянки с учетом вариативной пожарной нагрузки современных транспортных средств, в частности пожарной нагрузки электромобилей. Учет пожарной нагрузки данного типа автомобилей, позволит сделать вывод о пожарном риске на территории рассматриваемой автостоянки, что в свою очередь даст возможность планировать профилактические мероприятия по обеспечению пожарной безопасности автостоянок закрытого типа. Алгоритм методики представлен на Рисунке 11.

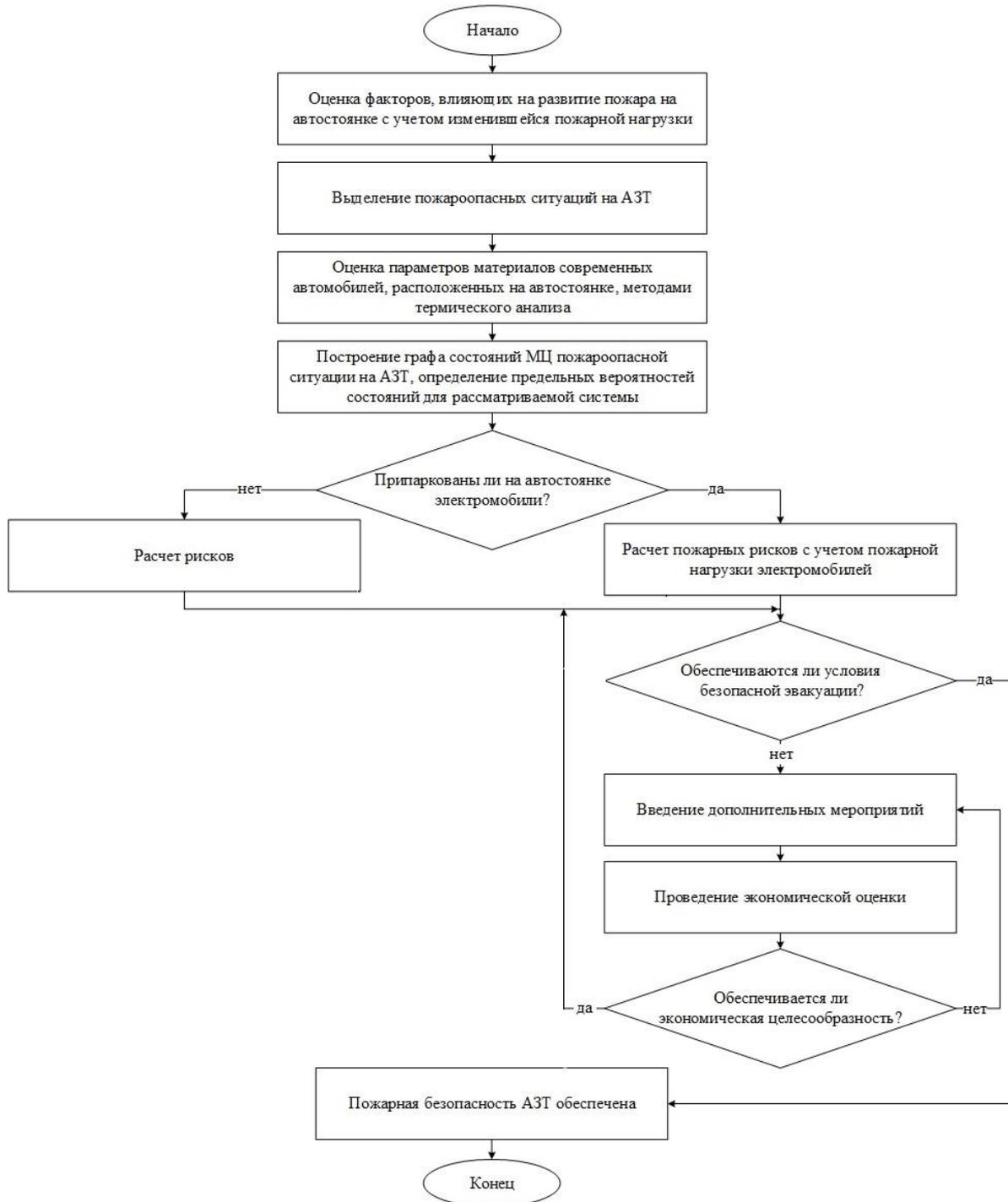


Рисунок 11 – Алгоритм методики обеспечения пожарной безопасности автостоянок закрытого типа с учетом изменившейся пожарной нагрузки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения настоящей работы была решена научная задача расширение методической базы обеспечения пожарной безопасности автостоянок закрытого типа для учёта вариативности пожарной нагрузки при размещении автомобилей на альтернативных источниках энергии. Достигнуты следующие результаты:

1. Введена информационная модель, основанная на декомпозиции факторов, влияющих на развитие процесса горения на автостоянках закрытого типа. В модели учтен ранжированный ряд факторов с учетом вариативности пожарной нагрузки и возможности применения новых средств тушения. Разработанная информационная модель позволяет исследовать сценарии развития пожара на автостоянках закрытого типа в программных комплексах на базе FDS для различных вариантов типа и расположения пожарной нагрузки.

2. Разработана динамическая модель пожаров автотранспортных средств на автостоянках закрытого типа, учитывающая эффективность действия средства тушения горящих электромобилей на основе базальной сетки. В ходе разработки динамической модели дополнена экспериментальная база определения параметров горения материалов, используемых в современных автомобилях, что позволяет повысить точность расчетов пожарного риска для автостоянок закрытого типа.

На использованное в экспериментальных исследованиях средство локализации и тушения пожаров на основе базального полотна получен патент РФ на полезную модель.

3. Предложена методика обеспечения пожарной безопасности автостоянок закрытого типа с учетом вариативной пожарной нагрузки, отличающаяся от известных ранее наличием инструментария для оценки пожарной нагрузки автотранспортных средств на альтернативных источниках энергии. В методике использован экспериментально определенный коэффициент эффективного срабатывания средства тушения на основе базальной сетки, применимого для локализации и тушения очага пожара при горении литий-ионных аккумуляторов.

Разработанная методика позволяет расширить возможности известных компьютерных методов моделирования пожаров, повышая объективность и доказательную силу компьютерных моделей развития пожара.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:

1. Акимова, А. Б. Анализ мест хранения автотранспорта с учетом пожарной безопасности / Ю. Д. Моторыгин, А. Б. Акимова // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2019. – № 2 (50). – С. 52-57. 0,8 п.л. / 0,4 п.л.

2. Акимова, А. Б. Моделирование пожара на автостоянке закрытого типа методом эмпирического подоби́я / А. Б. Акимова, Ю. Д. Моторыгин, В. А. Ловчиков // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2020. – № 1. – С. 76-82. 0,7 п.л./ 0,2 п.л.

3. Акимова, А. Б. Методика исследования динамики пожаров автотранспортных средств на автостоянках закрытого типа / Ю. Д. Моторыгин, А. Б. Акимова // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2021. – № 3 (22). – С. 34-36. 0,3 п.л. / 0,15 п.л.

4. Акимова, А. Б. Декомпозиция факторов, влияющих на развитие горения автотранспортных средств, в закрытых автостоянках / А. Б. Акимова, Ю. Д. Моторыгин // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2021. – № 1. – С. 9-15. 0,9 п.л. / 0,5 п.л.

5. Акимова, А. Б. Методика управления пожарной безопасностью на автостоянках закрытого типа / А. Б. Акимова, Ю. Д. Моторыгин // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2021. – № 3. – С. 29-36. 0,9 п.л. / 0,5 п.л.

6. Акимова, А. Б. Моделирование динамики пожаров автомобилей на различных видах топлива на автостоянках закрытого типа / А. Б. Акимова // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2021. – № 3. – С. 147-156. 0,8 п.л.

7. Средство тушения пожаров на автостоянках закрытого типа на основе базальтового полотна: патент РФ RU 217399 U1 Российская Федерация: МПК А62С 3/07, А62С 37/40, А62С 37/46 / Ивахнюк Г. К., Акимова А. Б., Константинова А. С., Моторыгин Ю. Д. – заявка № 2022129679 от 16.11.2022; опубл. 30.03.2023. Бюл № 10.

Публикации в других изданиях:

8. Акимова, А. Б. Пожарная безопасность автостоянок / А. Б. Акимова // Молодые ученые в решении актуальных проблем безопасности: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, Железногорск, 20 апреля 2018 г. – Железногорск: ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 118-119. 0,2 п.л.

9. Акимова, А. Б. Современные средства обеспечения пожарной безопасности на территории автостоянок закрытого типа / А. Б. Акимова // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2018. – Т. 1, № 9. – С. 4-6. 0,25 п.л.

10. Акимова, А. Б. Инновации в сфере обеспечения пожарной безопасности / А. Б. Акимова // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Актуальные вопросы безопасности при формировании культуры безопасной жизни: материалы XIV Международной научно-практической конференции, посвященной Году культуры безопасности, Воронеж, 29–30 марта 2018 г. –

Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2018. – С. 60-62. 0,25 п.л.

11. Акимова, А. Б. Средства обеспечения пожарной безопасности на территории автостоянок / А. Б. Акимова, Ю. Д. Моторыгин // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2018. – Т. 1. – С. 16-18. 0,25 п.л. / 0,15 п.л.

12. Акимова, А. Б. Классификация мест хранения автотранспорта с учетом пожарной безопасности / А. Б. Акимова, Ю. Д. Моторыгин // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2018: материалы Международной-научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 13–14 ноября 2018 г. – СПб.: СПб УГПС МЧС России, 2018. – С. 83-89. 0,6 п.л. / 0,3 п.л.

13. Акимова, А. Б. Технические решения в сфере обеспечения пожарной безопасности на территории автостоянок / А. Б. Акимова // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы формирование культуры безопасности жизнедеятельности: приоритеты, проблемы, решения: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 26 сентября 2018 г. – СПб.: СПб УГПС МЧС России, 2018. – С. 101-102. 0,25 п.л.

14. Акимова, А. Б. Анализ угроз пожарной безопасности автостоянок / А. Б. Акимова, Ю. Д. Моторыгин // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Железногорск, 26 апреля 2019 г. – Железногорск: СПб УГПС МЧС России, 2019. – С. 131-139. 0,6 п.л. / 0,3 п.л.

15. Акимова А. Б. Мероприятия необходимые для обеспечения пожарной безопасности на территории автостоянок закрытого типа / А. Б. Акимова, Ю. Д. Моторыгин, А. А. Баранов // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Современные методы и технологии предупреждения и профилактики возникновения чрезвычайных ситуаций: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 сентября 2019 г. – СПб.: СПб УГПС МЧС России, 2019. – С. 328-330. 0,7 п.л. / 0,15 п.л.

16. Акимова А. Б. Исследование горения автомобиля на автостоянке закрытого типа / А. Б. Акимова, Ю. Д. Моторыгин // Транспорт России: проблемы и перспективы - 2019: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12–13 ноября 2019 г. – СПб.: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2019. – С. 153-155. 0,3 п.л. / 0,15 п.л.

Подписано в печать	22.12. 2023 г.	Формат 60x84 1/16
Печать цифровая	Объем 1 п.л.	Тираж 100 экз.

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