

Поташев Дмитрий Анатольевич

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ
МНОГОУРОВНЕВЫХ ПОДЗЕМНЫХ АВТОСТОЯНОК**

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:	доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации Таранцев Александр Алексеевич
Официальные оппоненты:	Шебеко Юрий Николаевич доктор технических наук, профессор, ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны» МЧС России, отдел пожарной безопасности промышленных объектов, технологий и моделирования техногенных аварий научно - исследовательского центра нормативно - технических проблем пожарной безопасности, главный научный сотрудник Челекова Евгения Юрьевна кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», кафедра комплексной безопасности в строительстве, доцент
Ведущая организация:	ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится 5 сентября 2024 года в 15.00 на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 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), dsosvet@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 работы обусловлена следующими обстоятельствами:

во-первых, общемировой тенденцией роста общего числа автомобилей и их количества на душу населения. Например, в Российской Федерации лидерами по числу легковых автомобилей являются столицы – Москва (~3,6 млн) и Санкт-Петербург (~1,7 млн), а в целом по стране показатель N_T (количество легковых автомобилей на 1000 чел.) порядка 350. Мировые лидеры по этому показателю – Сан-Марино ($N_T=1263$), Монако ($N_T=899$) и США ($N_T=799$). Важная тенденция заключается в том, что всё большую долю среди автомобилей занимают газобаллонные (ГБА) как экологически более чистые и экономичные;

во-вторых, урбанизацией развитых стран и растущей стоимостью площади городов (мегаполисов, агломераций), что наряду с ростом числа легковых автомобилей их жителей и приезжих приводит к необходимости устройства многоуровневых автостоянок (класс конструктивной пожарной опасности

Ф 5.2), в т.ч. подземных, как отдельно стоящих, так и располагаемых под зданиями;

в-третьих, пожароопасностью автомобилей на жидком топливе и взрывопожарной опасностью ГБА;

в-четвёртых, особенностью конструкции подземных автостоянок. Их этажи (уровни), как правило, имеют большую площадь (порядка 3000 м²), что чревато риском быстрого распространения опасных факторов пожара (ОФП) при возгорании автомобилей и опасных факторов взрыва (ОФВ) – ударной волны, осколков и др. при взрыве ГБА.

В этой связи пожары в подземных автостоянках ввиду большого количества находящихся там автомобилей и их высокой пожарной нагрузки, а также сложности удаления высокотемпературных продуктов горения представляют опасность как для водителей, ставящих машины и собирающихся выехать, и их пассажиров, так и для участников тушения. Особую опасность представляют взрывы ГБА, поскольку ОФВ в замкнутых объёмах приводят к сложным ударно-волновым процессам, метательным эффектам, обрушению несущих конструкций и т.п. Также имеет место риск для зданий в случае размещения подземных автостоянок под ними.

Вышеуказанное свидетельствует о необходимости моделирования ОФП и ОФВ в подземных автостоянках и формирования методов снижения пожаровзрывоопасности таких автостоянок.

Таким образом, диссертационное исследование, в котором решается имеющая важное прикладное значение **научная задача** – разработка методического обоснования обеспечения пожаровзрывобезопасности

подземных автостоянок с учётом нахождения там как автомобилей с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) на жидком топливе, так и ГБА, является **актуальным**.

Степень разработанности темы исследования.

В области моделирования динамики ОФП известны работы: С.В. Пузача, Ю.А. Кошмарова, А.Ю. Снегирёва и др., пожарам на автомобильных стоянках посвящены исследования И.О. Литовченко, Ю.Д. Моторыгина, Д.В. Косенко, А.Б. Акимовой, В.А. Ловчикова, Н.С. Хынга, Динь Конг Хынг, О.О. Ворогушина, А.Я. Корольченко, Р.В. Глинистого, Е.Н. Кияткиной, С.В. Томина, В.М. Есина, С.П. Калмыкова, В.В. Рубцова, О.И. Орлова, Л.П. Вогмана, А.С. Барановского, И.Л. Хабирова, а также работы E.G. Butcher, A.C. Parnell, D. Drysdale, Ming-Wen Hsu, Shin-Ku Lee, Lin-Lin Huang, Yaw-Kuang Chen, and Chun-Mu Wu и др.

В части компьютерного моделирования взрывов и определению воздействия воздушной ударной волны (ВУВ) известны работы отечественных исследователей: Б.Е. Гельфанда, М.В. Сильникова, М.В. Бесчастнова, Ю.В. Захарова, С.А. Вальгер, Н.Н. Федоровой, М.Н. Данилова, А.В. Федорова, Ю.С. Зуева, Н.И. Карманова и др. За рубежом такие исследования проводили Т.А. Rose, А.М. Remennikov и др. Проблемами взрывоустойчивости зданий и сооружений также занимается НТЦ «Взрывоустойчивость» (НИУ МГСУ).

Целью настоящей работы является повышение уровня пожаровзрывобезопасности подземных автостоянок при наличии в них автомобилей на жидком топливе и ГБА, что имеет важное прикладное значение.

Для достижения целей работы поставлены следующие **задачи исследования**:

1. Разработать динамическую модель развития ОФП в многоуровневых подземных автостоянках с учётом наиболее проблемных сценариев расположения горящего автомобиля и каскадного характера развития пожара.

2. Разработать динамическую модель ударно-волновых процессов в подземной автостоянке при взрыве ГБА с учётом различных сценариев его расположения.

3. Разработать методы снижения взрывопожарной опасности подземных автостоянок с учётом нахождения на них как автомобилей на жидком топливе, так и ГБА.

Методы исследования: математическое моделирование, системный анализ, сценарное моделирование развития чрезвычайной ситуации (пожар, взрыв) на подземной автостоянке, эвристический метод (получен патент на изобретение).

Объект исследования – многоуровневые подземные автостоянки.

Предмет исследования – динамика и уровни опасных факторов пожара и взрыва в многоуровневых подземных автостоянках и методы повышения их пожаровзрывобезопасности.

Научная новизна результатов диссертационного исследования:

1. Предложена модель процесса распространения ОФП в многоуровневых подземных автостоянках и проведено исследование динамики ОФП при различных сценариях пожара и каскадном его развитии с переходом на соседние автомобили, что впервые позволило оценить время блокирования эвакуационных выходов из многоуровневой подземной автостоянки и соотнести его с расчётным временем эвакуации людей.

2. Предложена динамическая модель развития ударно-волновых процессов при взрыве ГБА в подземной автостоянке и проведено исследование поражающего воздействия параметров воздушной ударной волны (ВУВ) путём компьютерного моделирования при различных вариантах размещения ГБА, что впервые позволило оценить уровни импульсного силового воздействия на несущие конструкции многоуровневой подземной автостоянки и опасность для находящихся там людей и автомобилей.

3. Предложены методы, позволяющие обеспечить повышение пожаровзрывобезопасности подземных автостоянок за счёт применения инновационных технических решений путём оборудования таких автостоянок средствами сдерживания ОФП и снижения уровней ОФВ на стадиях как проектирования, так эксплуатации и реконструкции.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует п.4 «Исследование процессов протекания аварий, пожаров и взрывов, условий их каскадного и катастрофического развития, разработка методов оценки различных опасных воздействий на людей, объекты защиты и прилегающие территории, а также способов их снижения» и п.9 «Разработка научных основ, моделей и методов исследования процессов распространения опасных факторов пожара по объектам защиты» паспорта специальности 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки).

Теоретическая значимость результатов работы:

1. Расширены возможности динамической модели развития ОФП в многоуровневых подземных автостоянках за счёт нескольких методов описания пожарной нагрузки автомобиля и каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации, что позволяет повысить объективность моделирования пожара в многоуровневой подземной автостоянке.

2. Динамическая модель взрыва ГБА в подземной автостоянке позволяет оценить пиковый уровень избыточного давления во фронте ВУВ и последующее знакопеременное нагружение перекрытий многоуровневой

подземной автостоянки (МПА), что ранее не учитывалось при проектировании и эксплуатации.

Практическая значимость:

1. Динамическая модель развития ОФП в многоуровневых подземных автостоянках позволяет с учётом различных сценариев расположения горящего автомобиля оценить время блокирования эвакуационных выходов из многоуровневой подземной автостоянки, а также провести моделирование каскадного развития пожара автомобилей.

2. Динамическая модель ударно-волновых процессов в подземной автостоянке при взрыве ГБА позволяет с учётом различных сценариев расположения ГБА оценить уровни поражающего воздействия ВУВ на конструктивные элементы подземной автостоянки, соседние автомобили и людей.

3. Методы повышения пожаровзрывобезопасности подземных автостоянок с учётом нахождения на них как автомобилей с ДВС на жидком топливе, так и ГБА предусматривают оборудование автостоянок средствами сдерживания ОФП (выделение парковочной зоны противопожарными воротами, шторами, водяными завесами) и средствами снижения ОФВ – разделение объёма этажа автостоянки на зоны прозрачными орошаемыми ленточными завесами (получен патент RU 2803032 С1 на изобретение «Автостоянка закрытого типа с повышенной взрывопожарной безопасностью и способ использования данной автостоянки»), применение легкобрасываемых конструкций (ЛСК) и каналов выпуска ВУВ, а также усиление перекрытий и установка на них ударопоглощающих панелей.

Реализация результатов исследования

Результаты диссертационной работы внедрены в ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук; в ФГКВООУ ВО «Военная ордена Ленина академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулёва»; в ГКУ «Пожарно-спасательный отряд противопожарной службы Санкт-Петербурга по Приморскому району Санкт-Петербурга».

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается применением общенаучных методов, использованием современных сертифицированных компьютерных программ, корректным заданием исходных данных, непротиворечивостью полученных результатов и их согласованностью с результатами других авторов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Динамическая модель ОФП в многоуровневых подземных автостоянках с учётом различных сценариев расположения горящих автомобилей и каскадного характера развития пожара.

2. Динамическая модель ударно-волновых процессов в подземной автостоянке при взрыве ГБА с учётом различных сценариев его расположения.

3. Методы повышения пожаровзрывобезопасности подземных автостоянок с учётом нахождения на них как автомобилей на жидком топливе, так и ГБА.

Апробация результатов. Основные результаты исследования докладывались, обсуждались и получили одобрение на международных и всероссийских научно-практических конференциях: «Транспорт России: проблемы и перспективы – 2020» (Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 10-11.11.2020); «Пожарная безопасность: Современные вызовы. Проблемы и пути решения» (Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 22.04.2021); «Технологии построения когнитивных транспортных систем» (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 14.05.2021); «Транспорт России: проблемы и перспективы» (Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 10.11.2021); «Управление эксплуатационной работой на транспорте» (УЭРТ-2022, 16.03.2022); «Транспорт России: проблемы и перспективы» (Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 10.11.2022); «Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения» (Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 27.04.2023).

Публикации. В диссертацию включены материалы по 18 научным работам: 11 статей, опубликованных в журналах, включенных в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук...» (Перечень ВАК), 7 материалов, включены в сборники трудов научных конференций. Получен патент на изобретение.

Личный вклад автора. Автором разработаны: модель развития ОФП в МПА с учётом различных сценариев расположения горящего автомобиля, предложены методы моделирования каскадного развития пожара группы автомобилей; динамическая модель ударно-волновых процессов в подземной автостоянке при взрыве ГБА с учётом различных сценариев его расположения; методы снижения взрывопожарной опасности подземных автостоянок с учётом нахождения на них как автомобилей на жидком топливе, так и ГБА. Автор внёс вклад в изобретение в части конструктивного исполнения элементов взрывопожарной защиты автостоянки.

Структура работы. Диссертация объёмом 119 страниц состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы из 144 наименований и 3 приложений. Основной текст содержит 60 рисунков и 26 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснован выбор темы диссертации, актуальность работы, представлены научные результаты, выносимые на защиту, и их основные положения, а также данные об апробации и внедрении результатов диссертационного исследования. Показано, что проблема обеспечения пожарной и взрывоопасности подземных автостоянок актуальна.

В первой главе «Многоуровневые подземные автостоянки, особенности конструкции и проблема пожаровзрывоопасности автомобилей в подземных автостоянках» рассмотрены особенности конструктивно-компоновочных схем подземных автостоянок. МПА по конструктивному исполнению проектируются: отдельно стоящие или встроенные (рисунок 1 а, б), также по способу перемещения автомобиля: рамповые или автоматизированные (рисунок 2 а, б).



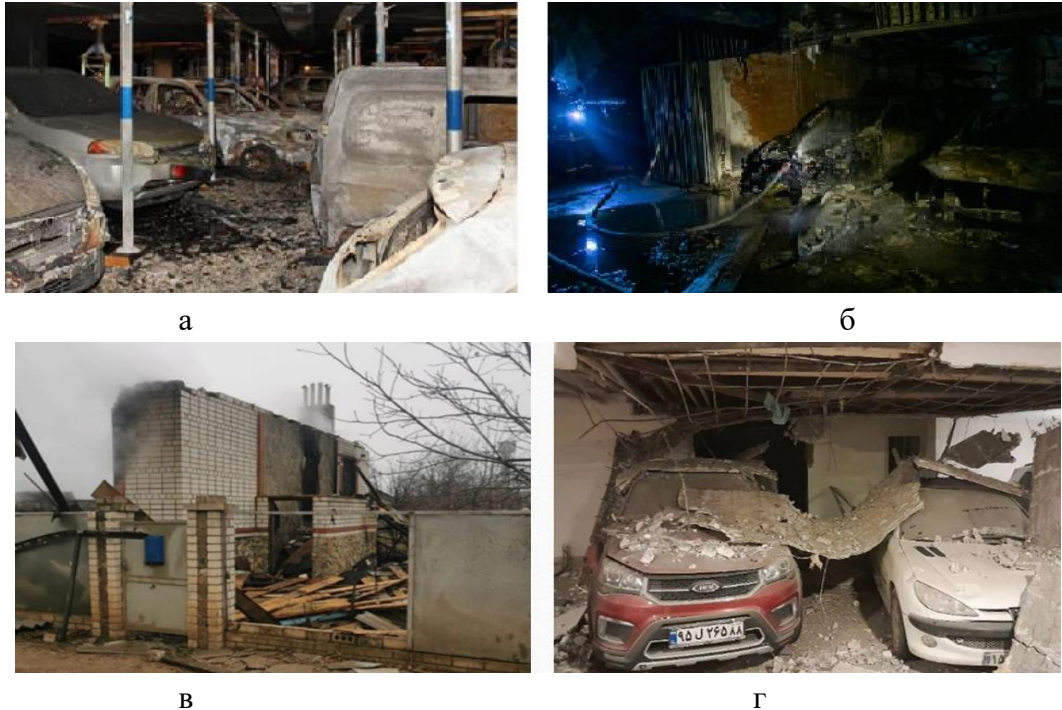
Рисунок 1 – МПА отдельно стоящая (а) и встроенная (б)
(эти и другие рисунки и фото – из открытого доступа в интернете)



а – рампа; б – механизированное перемещение автомобиля

Рисунок 2 – Внутренний вид МПА

Нормативные документы в области обеспечения пожарной безопасности регламентируют на подобных объектах наличие противопожарного водопровода, систем вентиляции и дымоудаления, пожарной сигнализации, автоматического пожаротушения и систем оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ). Однако рост количества автомобилей и подземных автостоянок приводят к повышению рисков возникновения пожаров на таких объектах, при этом системы пожарной защиты не всегда эффективны (рисунок 3 а, б).



а – г. Харлем; б – г. Москва; в – частный дом, пос. Иловля Волгоградской обл.;
г – г. Тегеран

Рисунок 3 – Последствия пожара и взрыва ГБА в подземных автостоянках

Важная современная тенденция – снижение выбросов от углеводородных топлив также коснулась и автотранспорта, ввиду появляется всё большее число ГБА. Хотя существует запрет на парковку ГБА ввиду их взрывоопасности в подземных автостоянках, но по причине сложности контролирования и недостаточной ответственности водителей нельзя исключать появление таких автомобилей в подземных автостоянках. На рисунке 3–в, г показаны примеры последствий взрывов ГБА в подземных автостоянках, приводящие к разрушению конструкций.

Таким образом, исследования в части повышения пожаровзрывобезопасности МПА являются актуальными и перспективными, имеющие научную и практическую направленность. Однако ввиду сложности натурного моделирования динамики ОФП и ОФВ в МПА, которое доступно только крупным исследовательским организациям, в данной работе использованы методы компьютерного моделирования.

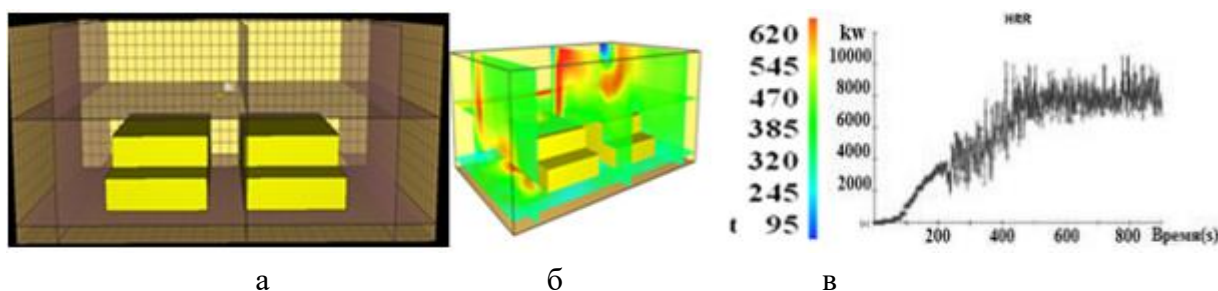
Во второй главе «**Методы компьютерного моделирования пожаров автомобилей и распространения опасных факторов пожаров в многоуровневых подземных автостоянках**» приведены основные теоретические сведения о моделировании развития ОФП. Показано, что из известных моделей динамики ОФП – интегральной, зонной и полевой – для МПА наиболее применима полевая (дифференциальная) модель. Поскольку расчёты уровней ОФП в полевой модели возможны только численными

методами, для моделирования пожара на подземной автостоянке была использована программа PyroSim, являющаяся пользовательским интерфейсом для программы Fire Dynamics Simulator (FDS).

Для наиболее точного моделирования пожара группы автомобилей были проведены предварительные модельные эксперименты. Их задачи заключались в сравнении компьютерной имитации пожара группы автомобилей с реально проведенными экспериментами (рисунок 5) по параметрам: а) переход пожара с одного автомобиля на другой, б) размеры зоны горения; в) величины ОФП (температура, задымление, концентрация токсичных продуктов горения) по результатам фиксации моделируемых ОФП группой виртуальных датчиков в программе.

Были разработаны 3 метода представления автомобилей в программе и использованы следующие исходные данные для каждого метода: а) размер модели выгороженной зоны парковки: $5 \times 7.5 \times 3$ м; б) группа виртуальных датчиков располагалась в точке с координатами (x, y, z) 3.75; 2.5; 1.75 м; г) для каждого варианта расчёта задавались 5 измерительных плоскостей (координаты по оси x: 0.75; 4.25; 7 м; по оси z: 0.25; 1.75 м), где регистрировались изменения температуры; д) расстояние между модельными объектами автомобилей 0.75 м; е) скорость распространения пламени 0,007 м/с; ж) источник пожара на плоскости 0.25×0.25 м; з) время работы источника 45 секунд. Реакция горения – функция PyroSim, задающая топливо, продукты горения – провода в резиновой изоляции и др.

Метод 1. Структура модели, в которой использована специальная функция PyroSim «Автомобиль АПТ» для создания группы модельных объектов, приведена на рисунке 4–а. Результаты компьютерного моделирования представлены на рисунках 4–б,в.



а – структура модели; б – визуализация результатов моделирования температуры на 480 с пожара; в – динамика мощности пожара

Рисунок 4 – Иллюстрация к модели 1

Методом 1 предусмотрено решение проблемы одновременного воспламенения модельных объектов, заключающееся в том, что объекту 1 имитирующему автомобиль изначально задана поверхность «Автомобиль

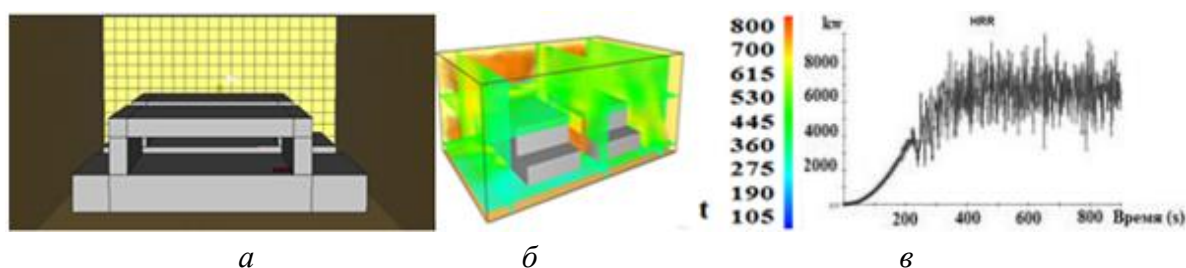
АПТ», объект 2 также имитирующему автомобиль, активируется как поверхность «Автомобиль АПТ» через 240 секунд (240 секунд время перехода пожара с одного автомобиля на другой, полученное при проведении натурного эксперимента, результаты которого размещены в открытых источниках).

В результате моделирования ОФП по методу 1 получена достаточно правдоподобная картина пожара автомобиля на подземной автостоянке. Однако выявлено также слишком быстрое распространение пламени по соседним автомобилям, что отчасти можно объяснить проливом топлива.

Для получения более объективной картины пожара автомобилей с бензиновыми двигателями на подземной автостоянке были разработаны ещё два уточняющих метода.

Метод 2. Модельному объекту (автомобиль с бензиновым ДВС) задается функция «многослойная поверхность». Данная функция позволяет придать ему определенную структуру из нескольких материалов (в данном методе: сталь 65%, ПВХ 20%, поролон 5%, резина 10%), заключенных в одной геометрической форме с учётом имитации свободного пространства салона автомобиля (рисунок 5–а). Одной из важных особенностей метода является возможность придания нужной из частей (сторон) модели задания функции горючего материала либо негорючего, в зависимости от моделируемого аналога.

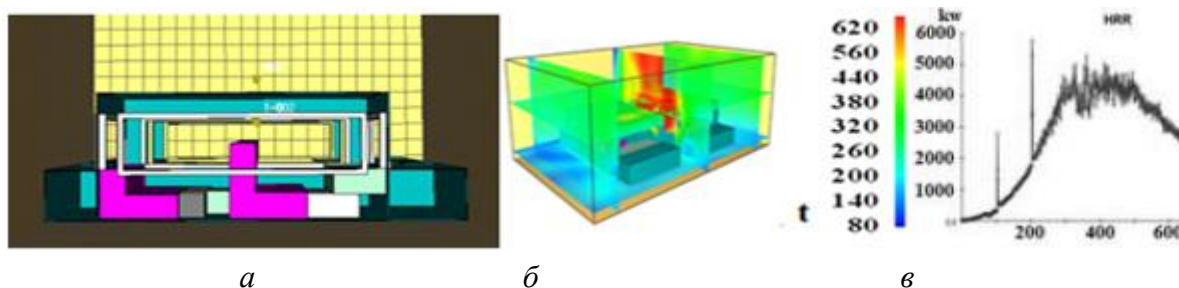
В результате моделирования ОФП по методу 2 получена уточнённая картина пожара автомобилей на подземной автостоянке (рисунок 5–б,в), причём величины ОФП вполне согласуются с аналогичными величинами, определёнными по методу 1 – таблица 1. Тем не менее, был разработан и 3–й ещё более детализированный метод.



а – структура модели; б – визуализация результатов моделирования температуры на 480 с пожара; в – динамика мощности пожара

Рисунок 5 – Иллюстрация к модели 2

Метод 3. Объект (автомобиль) создан из различных геометрических форм (рисунок 6–а), сопоставимых по размерам с реальными элементами структуры автомобиля, такими как кузов, сиденья и др., каждому элемент соответствует определенному типу материалов.



а – структура модели; б – визуализация результатов моделирования температуры на 480 с пожара; в – динамика мощности пожара

Рисунок 6 – Иллюстрация к модели 3

Метод 3 является ещё более точным и пригоден для ситуаций, когда нужно рассмотреть детальное развитие пожара (например, при экспертном исследовании) автомобиля на МПА с учётом пропорций геометрических форм и включенных в их структуру материалов. Результаты компьютерного моделирования представлены на рисунках 6–б,в. Также имеет место согласованность, полученных результатов по методу 3, с результатами методов 1 и 2.

Результаты регистрации группой виртуальных датчиков максимальных значений ОФП приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения ОФП при горении автомобилей в подземной автостоянке, полученные различными методами с виртуальных датчиков (за период 360–600 с пожара)

Метод	$T, ^\circ\text{C}$	$\text{O}_2, \text{кг/м}^3$	$\text{CO}, \text{кг/м}^3$	$\text{CO}_2, \text{кг/м}^3$
1. «Автомобиль АПТ»	400–600	5×10^{-2}	3.5×10^{-4}	0.010
2. Многослойная поверхность	450–800		3.2×10^{-4}	0,009
3. Геометрические формы пожарной нагрузки	450–800		2.8×10^{-4}	0,008

Для исследования распространения ОФП в МПА, а именно для определения времени t_n достижения ОФП в тамбур-шлюзе и лестничной клетке были заданы объёмно-планировочные параметры условной трёхуровневой подземной автостоянки (рисунок 7): объём этажа 2214 м^3 ($41 \times 18 \times 3 \text{ м}$).

На модели автостоянки с использованием программы PyroSim рассчитано несколько вариантов пожара легкового автомобиля (задана функция «многослойная поверхность» метод 2) с бензиновым ДВС при условии, что его пожарная нагрузка составляет 10365 МДж, а горящий автомобиль находится вблизи лестничной клетки и через некоторое время блокирует её. На рисунках 7–а_в приведены визуализированные результаты моделирования динамики ОФП для трёхуровневой автостоянки при возгорании автомобиля соответственно на верхнем, среднем и нижнем этажах.

Одновременно моделировалось движение людей (водителей, пассажиров) из опасной зоны на поверхность с использованием программы FireCat. Расчетные уровни ОФП, зарегистрированные виртуальными датчиками, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные уровни ОФП, зарегистрированные виртуальными датчиками

Место воздействия ОФП	Вид ОФП	Величина ОФП	Время достижения ОФП (секунды)
Рампа	Повышенная температура	$>70^{\circ}\text{C}$	150 – 200
Рампа Лестничные клетки Тамбур - шлюзы	Потеря видимости	$< 20\text{ м}$	300 > 900 600 – 900
Рампа Тамбур – шлюзы	Пониженное содержание O_2	ниже $0,226\text{ кг/м}^3$	150 – 200 > 600

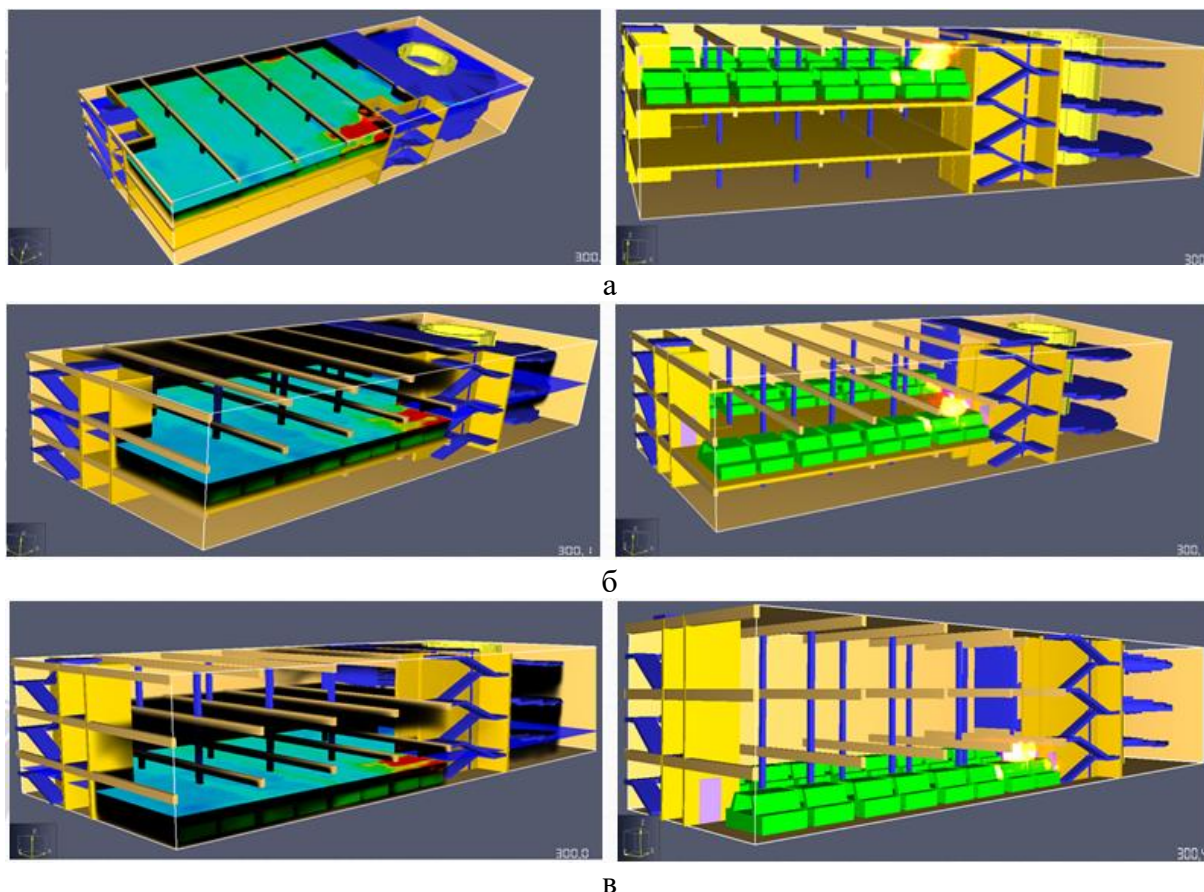


Рисунок 7 – Визуализация компьютерного моделирования развития пожара с использованием программы PyroSim в трехуровневой подземной автостоянке с круговой рампой – динамика ОФП на 5-й минуте пожара при возгорании автомобиля на верхнем (а), среднем (б) и нижнем (в) этажах

Из полученных результатов моделирования следует, что наиболее опасным для людей на МПА является задымление (потеря видимости) и пониженное содержание кислорода. При отсутствии или позднем срабатывании системы дымоудаления и автоматической установки пожаротушения (АУП) этаж пожара до прибытия пожарных полностью заполняется дымом менее чем за 5 мин, который через рампу попадает на вышележащие этажи и наружу. Компьютерное моделирование процесса эвакуации с использованием программы FireCat показало, что при своевременном срабатывании СОУЭ людские потоки в количестве 34 человек покинут парковочную зону, перемещаясь в тамбур-шлюз и в лестничную клетку расчетное за время $t_p=125-126$ с, время блокирования ОФП выхода из сооружения $t_{\text{бл}}=197-210$ с, что свидетельствует о возможности успешной эвакуации из МПА при пожаре.

Подобные расчёты целесообразно проводить для существующих и проектируемых МПА с целью обоснования возможности эвакуации людей при пожаре. Если будет получен отрицательный результат, то необходимо предусмотреть дополнительные мероприятия по обеспечению безопасности людей в МПА при пожаре.

Также показано, что пожар в МПА может носить каскадный характер: горение автомобиля с ДВС на жидком топливе может спровоцировать последовательные возгорания соседних автомобилей, а тушение пожара с последующим восстановлением повреждённой части МПА позволяет вернуть автостоянку в режим штатной эксплуатации. Данный процесс был описан с использованием математического аппарата марковских случайных процессов. В таблице 3 в качестве примера приведены граф и перечень состояний при каскадном процессе горения нескольких автомобилей, их тушения и восстановления автостоянки

Таблица 3 – Граф переходов и перечень состояний автостоянки при пожаре автомобилей

Граф переходов	Состояния $\{S\}$
	S_0 — нормальное функционирование автостоянки; S_1 — горит один автомобиль; S_2 — загорелся соседний автомобиль; S_{n-1} — загорелось $n-1$ автомобилей; S_n — тушение автомобилей и проведение восстановительных работ; $\{l_{ij}\}$ — «веса» дуг переходов в количестве $2n-1$

Полагая, что горение, тушение и восстановление работоспособности МПА представляет собой процесс с непрерывным временем и "веса" $\{l_{ij}\}$ являются интенсивностями переходов $\{\lambda_{ij}\}$ (в количестве $n+1$), получена

система из $n+1$ линейных дифференциальных уравнений 1-го порядка, которая при $n \geq 2$ имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -\lambda_{01}p_{01} + \lambda_{n0}p_n, \\ \frac{dP_i}{dt} = \lambda_{0i}p_{i-1} - (\lambda_{i,i+1} + \lambda_{i,n})p_i, i = 1, \dots, n-1, \\ \frac{dP_{n-1}}{dt} = \lambda_{n-2,n-1}p_{n-2} - \lambda_{n-1,n}p_{n-1}, \\ \frac{dP_n}{dt} = \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_{i,n}p_i - \lambda_{n0}p_n \end{cases} \quad (1)$$

(t – время; $P_0 \div P_n$ – вероятности соответствующих состояний), решение которой позволяет найти динамику вероятностей $P_i(t)$ ($i=0, \dots, n$) МПА. Например, для установившегося режима (производные в левой части =0) работы из (1) получаем:

$$\begin{cases} P_0 = \left[1 + \frac{\lambda_{0n}}{\lambda_{n0}} + \sum_{i=1}^{n-2} \prod_{j=1}^i \frac{\lambda_{j-1,j}}{\lambda_{j,j+1} + \lambda_{j,n}} + \frac{\lambda_{n-2,n-1}}{\lambda_{n-2,n-1}} \prod_{j=1}^{n-2} \frac{\lambda_{j-1,j}}{\lambda_{j,j+1} + \lambda_{j,n}} \right]^{-1}, \\ P_i = \sum_{j=1}^{n-2} \prod_{j=1}^i \frac{\lambda_{j-1,j}}{\lambda_{j,j+1} + \lambda_{j,n}} P_0, i = 1, \dots, n-2, \\ P_{n-1} = \frac{\lambda_{n-2,n-1}}{\lambda_{n-2,n-1}} P_{n-2}, \\ P_n = \frac{\lambda_{0n}}{\lambda_{n0}} P_0. \end{cases} \quad (2)$$

В главе приведены численные оценки вероятностей $\{P\}$ при различных значениях n и $\{\lambda\}$.

В третьей главе «Метод компьютерного моделирования взрыва газобаллонного автомобиля и распространение воздушной ударной волны в подземной автостоянке» показано, что пожаровзрывоопасные процессы в МПА могут носить каскадный характер: пожар автомобиля (автомобилей) на автостоянке может спровоцировать взрыв находящегося там ГБА (нагрев газа и недопустимое повышение его давления в баллоне), либо взрыв ГБА (например, детонация утечек газа в подкапотном пространстве при включении зажигания) может спровоцировать опасные повреждения и возгорания соседних автомобилей. В работе исследование таких процессов также проводилось с использованием цепей Маркова – на рисунке 8 показана логическая схема для такой цепи.

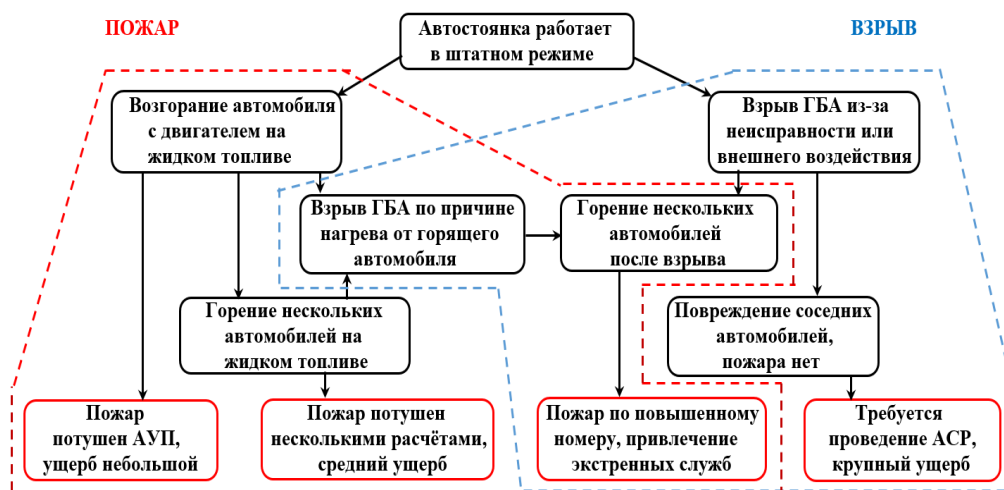
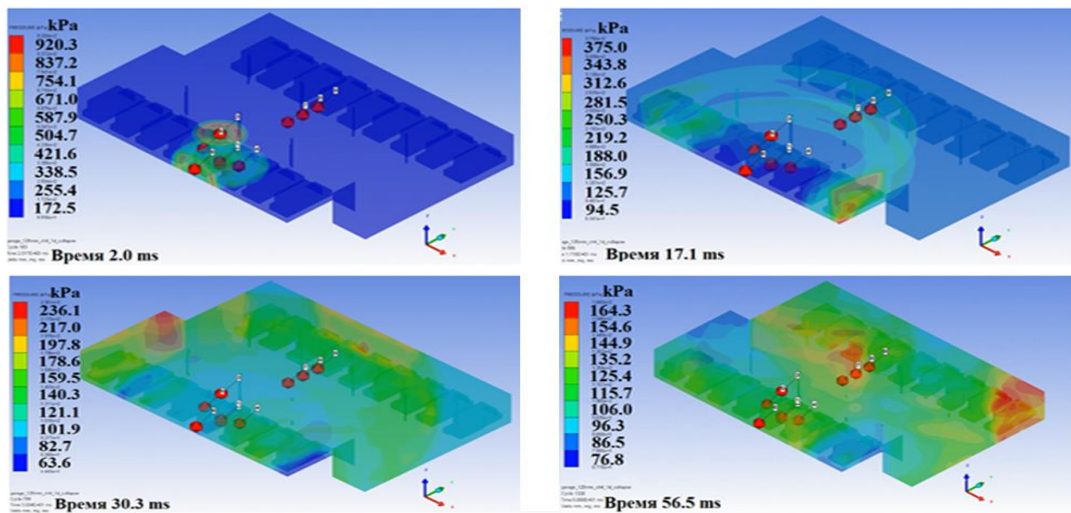


Рисунок 8 – Логическая схема каскадного развития пожаровзрывоопасной ситуации в подземной автостоянке

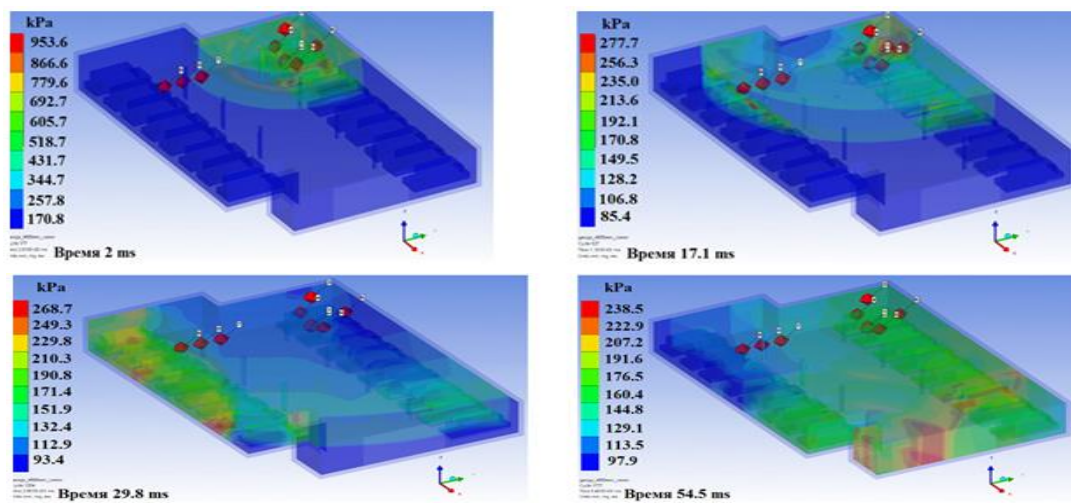
В главе приведены теоретические сведения о моделировании разлета воздушных ударных волн (ВУВ). Показано, что, в отличие от ОФП, расчёт динамики ОФВ намного более трудоёмкий и характеризуются сложными ударно-волновыми процессами, приводящими к знакопеременному нагружению перекрытий и стен, а также к метательному эффекту, опасному для находящихся там людей и автомобилей. Для оценки воздействия на конструктивные элементы, электрооборудование автостоянки и АУП наиболее разрушительного ОФВ - ВУВ в работе была использована компьютерная программа Ansys Autodyn. С её помощью для характерных сценариев взрыва ГБА (в центре и у стены этажа) получена визуализация прохождения ВУВ в парковочной зоне объёмом 1336.2 м^3 ($26.2 \times 17 \times 3 \text{ м}$) подземной автостоянки (рисунок 9) и оценена динамика избыточного давления (рисунок 10).

Как следует из результатов моделирования, пик избыточного давления в ударной волне может нескольких атмосфер, потом наступает фаза разрежения - давление на перекрытие этажа носит знакопеременный характер, что чревато угрозой обрушения, т.к. перекрытие МПА рассчитано только на вес автомобилей (с коэффициентом запаса прочности) и предел огнестойкости, но не на воздействие ВУВ при взрыве ГБА.

В четвертой главе **«Предложения по повышению пожаровзрывобезопасности многоуровневых подземных автостоянок»** сформулированы основные направления, которые можно разделить на пассивную и активную взрывопожарную защиту автостоянок, на действия персонала до прибытия сил и средств пожарной охраны и на действия должностных лиц пожарной охраны в случае пожара и/или взрыва на подземной автостоянке.



а



б

а – полукруговой разлет, б – угловой разлет

Рисунок 9 – Визуализация динамики ВУВ при взрыве ГБА в подземной автостоянке

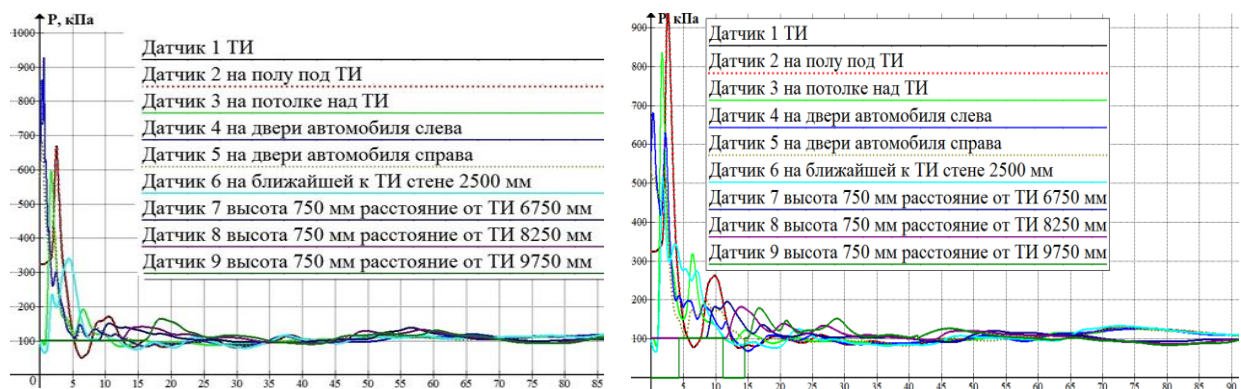
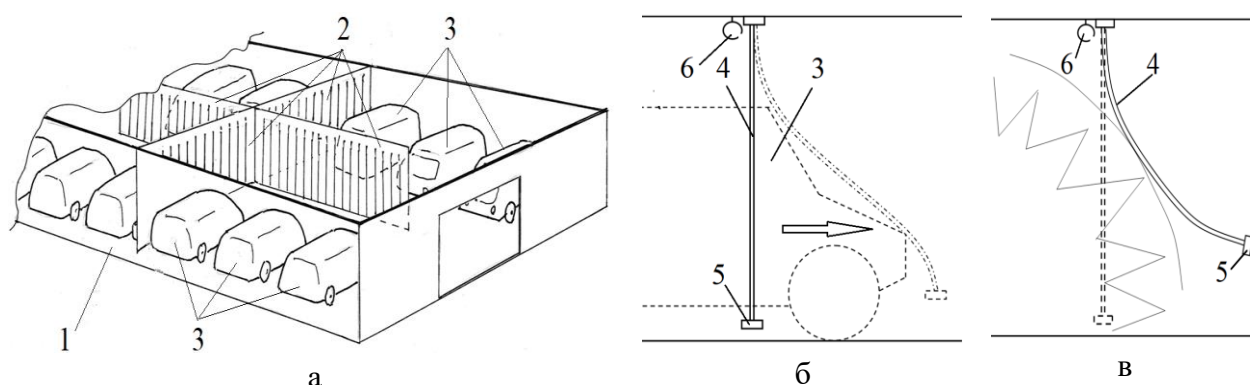


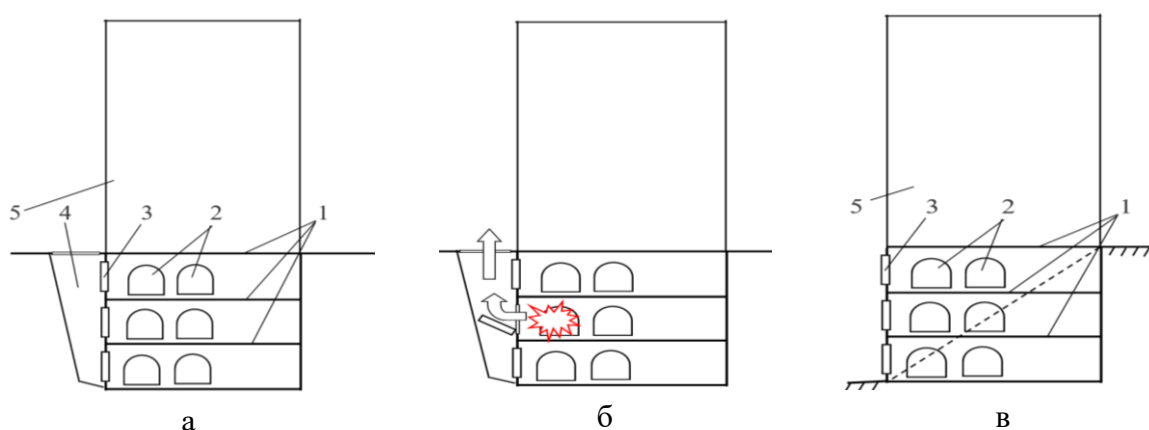
Рисунок 10 – Динамика избыточного давления в ВУВ при взрыве в центре (левый график) и стены (правый график), на горизонтальной оси – время в миллисекундах

К пассивной взрывопожарной защите можно отнести: усиление пределов огнестойкости ограждающих конструкций, оборудование автостоянки

противопожарными воротами и шторами. При возможности наличия ГБА на МПА для повышения её взрывобезопасности предложено и запатентовано (патент РФ 283032 «Автостоянка закрытого типа с повышенной взрывопожарной безопасностью и способ использования данной автостоянки») использование прозрачных ленточных завес, разделяющих объём этажа на стояночные зоны (рисунок 11 а). При штатной работе автостоянки эти завесы не препятствуют перемещению автомобилей (рисунок 11 б), но при взрыве ГБА частично гасят энергию взрыва, снижая поражающее действие ОФВ (рисунок 11 в) – ВУВ, осколков, теплового излучения.



а – вид этажа 1 с ленточными завесами 2, разделяющими этаж на парковочные зоны с различными типами автомобилей 3 – на жидком и газовом топливе; б – работа элемента 4 ленточной завесы при прохождении через неё автомобиля 3; в – снижение интенсивности ВУВ при взрыве газового баллона; 5 – стабилизирующий груз, 6 – орошающий трубопровод
Рисунок 11 – Разделение этажа МПА ленточными завесами на зоны



а – встроенная подземная автостоянка, б – выход ВУВ через ЛСК при взрыве ГБА, в – встроенная автостоянка при перепаде высот местности;
1 – парковочные площади, 2 – автомобили, 3 – ЛСК, 4 – выпускной колодец, 5 – здание
Рисунок 12 – Применение ЛСК для взрывозащиты встроенной подземной автостоянки

К пассивной взрывопожарной защите МПА также можно отнести усиление перекрытий армирующими конструкциями и демпфирующей панелью для частичного поглощения энергии ВУВ, а также каналы с ЛСК (рисунок 12) для выпуска энергии ВУВ. При этом ЛСК могут выполняться светопрозрачными, каналы снабжены ступенями, что позволяет каналы использовать в качестве аварийных выходов и для проникновения пожарных подразделений в МПА.

К активной взрывопожарной защите МПА можно отнести оборудование её противодымной вентиляцией, пожарной сигнализацией, СОУЭ и АУП как с активацией от теплового разрушения колбы при пожаре автомобиля, так и с принудительным пуском, например, с использованием водяных АУП–Гефест согласно СТО 420541.004, ВНПБ 40–16. Также МПА целесообразно оборудовать автоматическими установками сдерживания пожара, размещаемыми у рампы и входов в тамбур–шлюз (лестничные клетки) для обеспечения эвакуации людей. Может быть предусмотрено и орошение ленточных завес (рисунок 12) водой для сдерживания ОФП при возгорании автомобиля.

При возможности наличия ГБА необходимо оснастить МПА газоанализаторами, которые при повышении концентрации горючего газа (например, при утечках из газобаллонного оборудования автомобиля) инициируют включение системы вентиляции и выдают сигнал на пост безопасности автостоянки.

Действия персонала МПА при пожаре могут заключаться в инициировании систем активной взрывопожарной защиты и СОУЭ; в сообщении о пожаре в пожарную часть, в районе выезда которой МПА находится; в эвакуации и спасении людей до прибытия сил и средств пожарной охраны и в объективном информировании начальника первого прибывшего караула о ситуации на МПА, прежде всего – о наличии и вероятных местах нахождения людей и о наличии и местах нахождения ГБА.

Даны рекомендации по особенностям действий должностных лиц пожарной охраны – прежде всего проведения разведки и спасения людей, а также в проведении аварийно-спасательных работ и привлечении при необходимости экстренных служб города (полиции, медиков) в случае повышенного номера пожара и взрыве ГБА.

Показано, что получаемые результаты позволяют разработать специальный документ – «Рекомендации по тушению пожаров в многоуровневых подземных автостоянках» и приведена структура этого документа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что в диссертации решена имеющая важное прикладное значение **научная задача** – разработка методического обоснования обеспечения пожаровзрывобезопасности подземных автостоянок с учётом нахождения там как автомобилей с ДВС на жидком топливе, так и ГБА. В ходе проведённого исследования получены следующие результаты:

1. Приведены данные о динамике роста числа автомобилей, в т.ч. газобаллонных, и их пожаровзрывоопасности. Показана тенденция к строительству МПА и обоснована необходимость обеспечения пожаровзрывобезопасности таких автостоянок.

2. Разработана динамическая модель развития ОФП в многоуровневых подземных автостоянках с учётом наиболее проблемных мест расположения горящего автомобиля – у эвакуационных выходов из различных этажей (уровней) подземной автостоянки. Реализация модели в программах PyroSim впервые позволяет оценивать критические значения ОФП и определять тем самым необходимое и расчётное время эвакуации людей как из действующих, так и из проектируемых автостоянок и принимать тем самым необходимые меры для обеспечения пожарной безопасности. Также разработана модель каскадного развития пожара на автостоянке, позволяющая и оценить вероятности её состояний.

3. Разработана динамическая модель ударно–волновых процессов в подземной автостоянке при взрыве ГБА с учётом различных сценариев его расположения. Реализация модели в программе Ansys Autodyn позволяет без проведения натурных испытаний оценить возникающие при взрыве ГБА уровни давления в ВУВ, воздействующей на людей, соседние автомобили (в т.ч. спровоцировать пожары автомобилей) и строительные конструкции автостоянки. Также разработана модель каскадного развития взрывопожароопасной ситуации на автостоянке, позволяющая и оценить вероятности возможного ущерба.

4. Разработаны инновационные методы повышения пожаровзрывобезопасности подземных автостоянок за счёт оборудования средствами сдерживания ОФП и снижения уровней ОФВ: разделение объёма этажа автостоянки прозрачными орошаемыми ленточными завесами, применения легкобрасываемых панелей и каналов выпуска энергии ВУВ (каналами с ЛСК целесообразно оборудовать каждую зону, выделенную ленточными завесами, ЛСК выполнить сетопрозрачными, а каналы оборудовать ступенями, превратив их в аварийные выходы и пути доступа пожарных), а также усиление перекрытий и установки на них ударопоглощающих панелей. Сформулированы рекомендации персоналу МПА и экстренным службам по действиям при пожаре и взрыве.

5. Полученные результаты позволяют предложить перспективные направления дальнейших исследований: во–первых, разработать специальный документ – «Рекомендации по тушению пожаров в многоуровневых подземных автостоянках», во–вторых, продолжить исследования в области обеспечения пожаровзрывобезопасности паромных автомобильных перевозок, в–третьих, использовать полученные результаты при разработке нового нормативного документа в части требований пожарной безопасности к подземным автостоянкам.

Результаты диссертационного исследования полностью изложены автором в научных статьях.

Статьи в издании, индексируемом в международной цитатно-аналитической базе данных Web of Science:

1. Поташев, Д.А. Пожаровзрывобезопасность автомобильных палуб (стоянок) на паромах / Д.А. Поташев, А.А. Таранцев, В.И. Куватов // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – Том 1, № 1. – С. 12-17 (0,69/0,2 п.л.).

2. Поташев, Д.А. Основы управления пожаровзрывобезопасностью паромных автоперевозок при наличии газобаллонных автомобилей / Д.А. Поташев, А.А. Таранцев, Д.А. Скороходов // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – № 4, № 1. – С. 279-283 (0,69/0,23 п.л.).

Статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:

3. Поташев, Д.А. Особенности распространения опасных факторов пожаров в подземных стоянках автомобилей / Д.А. Поташев, А.А. Таранцев, Г.Л. Шидловский // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2020. – № 1 [53]. – С. 43-52 (1,04/0,7 п.л.).

4. Поташев, Д.А. Особенности развития пожаров автомобилей в подземных автостоянках и их тушение / Д.А. Поташев, А.А. Таранцев, Г.Л. Шидловский // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2021. – № 1 [57]. – С.108-115 (0,81/0,6 п.л.).

5. Поташев, Д.А. О проблеме взрывопожароопасности подземных автостоянок / Д.А. Поташев // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2021. – № 4 [60]. – С. 132-139 (0,92 п.л.).

6. Поташев, Д.А. О пожароопасности некоторых типов автомобилей / Д.А. Поташев, А.А. Таранцев, М.Р. Сытдыков // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2021. – № 1. – С.1-8 (0,92/0,63 п.л.).

7. Поташев, Д.А. Проблема взрывопожарной опасности подземных автостоянок и её возможное решение / Д.А. Поташев, Л.Т. Танклевский,

А.А. Таранцев, О.А. Зыбина // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. – Том 11, № 4 (60). – С. 225-232 (0,46/0,25 п.л.).

8. Поташев, Д.А. О повышении взрывобезопасности подземных стоянок автомобилей / Д.А. Поташев, А.А. Таранцев // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – № 1 (65). – С. 38-46 (0,58/0,36 п.л.).

9. Поташев, Д.А. Сетевые модели управления силами и средствами при тушении транспортных средств и проведении аварийно-спасательных работ / А.А. Таранцев, Д.А. Поташев, Т.С. Ульяновская // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2023. – № 1. – С. 145-152 (0,82/0,23 п.л.).

10. Поташев, Д.А. Об опасности взрывов газа в замкнутых строительных объёмах / Д.А. Поташев // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2023. – № 2. – С. 181-186 (0,9 п.л.).

11. Поташев, Д.А. О моделировании каскадного развития ЧС при пожарах в подземных автостоянках / Д.А. Поташев, А.А. Таранцев, А.В. Матвеев, М.Е. Шкитронов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – № 3 (67). – С. 131-140 (0,68/0,26 п.л.).

Патент на изобретение

12. Поташев, Д.А. Автостоянка закрытого типа с повышенной взрывопожарной безопасностью и способ использования данной автостоянки / Л.Т. Танклевский, А.А. Таранцев, О.А. Зыбина, Д.А. Поташев, Д.А. Колесников, И.Д. Балабанов // Патент RU 2803032 С1, зарегистрирован в госреестре изобретений Российской Федерации 05.09.2023.

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

13. Поташев, Д.А. Автомобили и их пожароопасность / Д.А. Поташев, А.А. Таранцев, А.С. Дорожкин // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2020: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10-11.11.2020. – СПб.: ИПТ РАН, 2020. – Том 1. – С. 253-257.

14. Поташев, Д.А. Особенности развития и тушения пожаров в подземных автостоянках / Д.А. Поташев, А.А. Таранцев // Пожарная безопасность: Современные вызовы. Проблемы и пути решения: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22.04.2021. – СПб.: СПб УГПС МЧС России, 2021. – С. 45-48.

15. Поташев, Д.А. Проблемы обеспечения пожаровзрывобезопасности подземных автостоянок / Д.А. Поташев // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2021: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 09–10.11.2021. – СПб.: ИПТ РАН, 2021. – Том 2. – С. 88-93.

16. Поташев, Д.А. Подземные автостоянки и их пожароопасность / Д.А. Поташев, А.А. Таранцев // Технологии построения когнитивных транспортных систем: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 14.05.2021. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2021. – С. 109-112.

17. Поташев, Д.А. Методы моделирования пожара автомобиля с помощью программы PyroSim / Д.А. Поташев, А.А. Таранцев // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2022: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 9-10.11.2022. – СПб.: ИПТ РАН, 2022. – Том 1. – С. 261-268.

18. Поташев, Д.А. О проблеме взрывопожароопасности депо и гаражей / А.А. Таранцев Д.А. Поташев // Управление эксплуатационной работой на транспорте – УЭРТ–2022: материалы Международная научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 16.03.2022. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2022. – С. 141-144.

19. Поташев, Д.А. Предложения по повышению пожаро- и взрывобезопасности многоуровневых подземных автостоянок / Д.А. Поташев // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения: международная научно-практическая конференция, Санкт-Петербург, 27.04.2023. – СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, 2023. – С. 128-135.

Подписано в печать

08.05.2024 г.

Формат 60x84 1/16

Печать цифровая

Объем 1,0 п.л.

Тираж 100 экз.

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