

На правах рукописи



Колодяжный Сергей Александрович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ
ЭВАКУАЦИИ ОПАСНЫМИ ФАКТОРАМИ ПОЖАРА
В МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЦЕНТРАХ**

Специальность 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность
(технические науки, отрасль строительство)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Воронеж – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет».

Научный консультант: Пузач Сергей Викторович,
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Гилетич Анатолий Николаевич – доктор
технических наук, старший научный сотрудник,
Департамент по строительству и эксплуатации
гражданских объектов ПАО «Ростелеком»,
начальник отдела производственного контроля

Таранцев Александр Алексеевич – доктор
технических наук, профессор,
ФГУН институт проблем транспорта им. Н.С.
Соломенко РАН, заведующий лабораторией
«Проблемы безопасности транспортных систем»

Хасанов Ирек Равильевич – доктор технических
наук, старший научный сотрудник, научно-
исследовательский центр нормативно-
технических проблем пожарной безопасности
ФГБУ ВНИИПО МЧС России, главный научный
сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет» (НИУ МГСУ)

Защита состоится «04» октября 2017 года в 13 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета Д 205.002.02 при Академии ГПС МЧС России по
адресу: 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России
и на сайте:
<http://academygps.ru/upload/iblock/33f/33f9eb253a9b67b16e3f64e441d059ec.pdf>
Автореферат диссертации разослан «30» июня 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета  Сивенков Андрей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Многофункциональные центры (МЦ) являются уникальными зданиями с массовым пребыванием людей, объединяющие помещения различных классов функциональной пожарной опасности с разнородной пожарной нагрузкой, со сложными горизонтальными и вертикальными связями и наличием практически всех систем пожарной безопасности. В последние годы в мире и в России, в основном из-за несоблюдения необходимых норм пожарной безопасности, произошло много крупных пожаров в МЦ, приведших к массовой гибели людей и большому материальному ущербу. В современных строительных нормативно-технических документах в рамках действующего гибкого объектно-ориентированного противопожарного нормирования уделяется большое внимание безопасной эвакуации людей при возникновении пожара в различных зданиях и сооружениях. В соответствии с требованиями Федерального закона ФЗ №123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» любое здание должно иметь такие объемно-планировочные решения, чтобы все люди, находящиеся в здании, могли в случае пожара беспрепятственно выйти в безопасную зону до момента достижения опасными факторами пожара их критических значений. При этом разработка оптимальных объемно-планировочных решений во многом определяется величиной необходимого времени эвакуации людей при пожаре. В ряде случаев расчет необходимого времени эвакуации людей, выполненный по методикам расчета пожарных рисков (Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. Приложение к приказу МЧС России от 30.06.2009 № 382 и др.), не согласуется с данными натурных и экспериментальных исследований, а также полученными из анализа протекания реальных пожаров. Эти расхождения в основном объясняются тем, что проблема математического моделирования динамики опасных факторов пожара (ОФП) во время эвакуации людей до конца не решена, и достаточно часто расчет ОФП не рассматривается при разработке проектных решений с учетом требований пожарной безопасности к путям эвакуации.

Несмотря на достаточно большое количество отечественных (Кошмаров Ю.А., Рыжов А.М., Зотов Ю.С., Есин В.М., Пузач С.В., Присадков В.И. и др.) и зарубежных (Tanaka T., Chow W. K., Yamada S., Matsuyama K., Lougheed G. D. и др.) работ, посвященных моделированию динамики ОФП, ряд важных с научной и практической точек зрения закономерностей развития термогазодинамической картины пожара, связанных, например, с влиянием работы системы дымоудаления (СДУ), неустановившейся скорости выгорания горючего материала и т.д., до конца не выявлен. Поэтому необходима разработка комплекса математических моделей, позволяющих учесть наиболее важные не решенные проблемы.

Аналитические решения существующих интегральных моделей пожара получены с использованием некоторых допущений и упрощений. В ряде случаев эти решения не учитывают влияние функционирования СДУ, в том числе ее время включения и объемный расход. Противодымную защиту зданий и сооружений можно обеспечить системой механического удаления дыма с оптимальным расположением приточно-вытяжных каналов, исключающих задымление путей эвакуации (коридоров, лестничных клеток), смежных помещений и распространение пожара за пределы помещения с очагом возгорания. Одним из недостатков нормативных документов, касающихся СДУ, является отсутствие простых аналитических формул, которые при определенном наборе исходных параметров позволяют определить динамику ОФП в помещении с очагом возгорания, начальные данные для расчета СДУ, критическое время эвакуации без применения специальных программ на ПЭВМ.

В существующих зонных моделях одним из существенных недостатков является рассмотрение конвективной колонки, образующейся над очагом возгорания, как свободно-конвективной струи, распространяющейся в неограниченном пространстве. Такой подход не учитывает влияние ограждающих конструкций помещения на параметры колонки, так как фактически струя смеси продуктов горения и воздуха натекает на преграду (перекрытие помещения). Традиционный подход приводит к значительной погрешности в определении распределения массовых расходов газовой смеси по высоте колонки, и, соответственно, к существенной ошибке (порядка в 100-700 %) в расчете величины объемного расхода удаляемого дыма СДУ.

Точность расчета динамики ОФП в большой степени определяется достоверностью исходных данных по свойствам пожарной нагрузки. Одной из наименее изученных проблем является определение удельной массовой скорости выгорания твердых горючих материалов и жидкости при неустановившемся процессе ее горения с учетом работы СДУ, времени ее включения и объемного расхода.

Следовательно, для достоверного прогнозирования времени блокирования путей эвакуации ОФП в помещениях МЦ **актуальными проблемами** являются разработка аналитического метода в условиях функционирования СДУ, модификация зонной модели с учетом влияния ограждающих конструкций на параметры конвективной колонки и получение экспериментальных данных по удельной массовой скорости выгорания горючих материалов. Решение вышеуказанных проблем имеет важное значение при выборе объемно-планировочных и технических решений, обеспечивающих безопасную эксплуатацию МЦ.

Анализ состояния проблемы позволил сформулировать **общую концепцию исследования**: разработка научных основ для создания комплекса математических моделей расчета динамики ОФП, позволяющего определить время блокирования путей эвакуации ОФП при работе СДУ с целью снижения пожарного риска в МЦ за счет оптимизации объемно-планировочных и

конструктивных решений МЦ.

Объектом исследования являются тепло- и массообменные процессы, возникающие при пожаре в МЦ в условиях работы СДУ и являющиеся основой для прогнозирования времени блокирования путей эвакуации ОФП.

Предметом исследования в диссертации является прогнозирование времени блокирования путей эвакуации ОФП в МЦ в условиях работы СДУ.

Цель и задачи работы. Цель диссертационной работы заключается в разработке комплекса уточненных моделей пожара и методики расчета динамики ОФП, учитывающих специфику объемно-планировочных и конструктивных решений МЦ, например, работу СДУ, неустановившуюся скорость выгорания горючих веществ и форму конвективной колонки.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- с учетом особенностей пожарной опасности МЦ провести анализ известных методик расчета критического времени эвакуации людей из помещений, работ по безопасной эвакуации людей при пожаре в условиях функционирования СДУ, методов расчета параметров СДУ, и на основании анализа сформулировать наиболее актуальные нерешенные задачи в существующих методах расчета;

- разработать модифицированную зонную модель с учетом влияния ограждающих конструкций помещения на параметры конвективной колонки; провести экспериментальные исследования на макете помещения и выполнить тестирование предложенной модели на полученных опытных данных;

- получить на основе интегральной модели аналитические зависимости для определения критической продолжительности пожара на начальной стадии его развития по условиям достижения величинами ОФП их критических значений в помещении с очагом возгорания и в смежных с ним помещениях, провести анализ полученных аналитических выражений, описывающих динамику задымления помещений, в зависимости от изменения исходных параметров задачи;

- провести экспериментальные исследования динамики удельной массовой скорости выгорания в условиях горения твердых горючих материалов и неустановившегося процесса выгорания жидкости с учетом работы СДУ, времени ее включения и объемного расхода с целью разработки регрессионных уравнений для использования в аналитических зависимостях расчета значений ОФП для начальной стадии развития пожара;

- на базе уточненной интегральной математической модели пожара выполнить теоретические исследования по изучению влияния работы СДУ на динамику ОФП с учетом объемного расхода и времени включения противодымной вытяжной вентиляции в условиях горения твердых горючих материалов и неустановившегося процесса выгорания жидкости;

- рассмотреть примеры расчета и анализа динамики ОФП в МЦ с использованием полевой модели пожара с целью выявления закономерностей развития пожара, которые существенно влияют на обеспечение безопасной

эвакуации людей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана уточненная зонная модель расчета величин ОФП в помещениях с учетом работы СДУ, учитывающая форму конвективной колонки с помощью зависимости локального угла полураскрытия колонки от высоты ее поперечного сечения.

2. Получены новые экспериментальные данные по углу полураскрытия конвективной колонки, позволяющие более точно, чем в существующих подходах, определить объемный расход СДУ.

3. С помощью аналитических решений системы дифференциальных уравнений интегральной математической модели получены новые функциональные зависимости, описывающие процесс задымления помещений, смежных с очагом возгорания, и позволяющие прогнозировать динамику ОФП с получением исходных параметров для оптимизации работы СДУ.

4. Получены новые экспериментальные данные по динамике изменения удельной массовой скорости газификации в условиях горения твердых горючих материалов и при неустановившемся процессе горения жидкости с учетом работы СДУ, а также ее объемного расхода и времени включения.

5. Опираясь на результаты проведенного экспериментального исследования, получены аналитические уравнения регрессии, определяющие зависимость изменения удельной массовой скорости выгорания твердых материалов и жидкости с учетом времени включения СДУ и ее объемного расхода.

Обоснованность и достоверность научных результатов. При получении новых функциональных зависимостей применялись уточненные интегральные и зонные модели пожаров, широко используемые в работах других авторов. Методы теоретического исследования опирались на фундаментальные законы сохранения массы, энергии и импульса. При планировании эксперимента разработан композиционный план Бокса-Уилсона 3-го порядка с дополнением в виде «звездных точек» с целью получения достоверных регрессионных уравнений, а также сокращения количества опытов при определении последовательности проведения экспериментальных исследований. С помощью выбранного плана выполнена первичная статистическая обработка результатов проведенных серий экспериментов. Результаты экспериментальных данных и теоретических расчетов имеют удовлетворительную сходимость.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанный комплекс математических моделей расчета динамики ОФП с предложенной на его основе методикой определения времени блокирования путей эвакуации ОФП, использующий модифицированные интегральную и зонную модели, позволяет спрогнозировать критическое время блокирования путей эвакуации с учетом работы СДУ и приточной вентиляции, реальных свойств горючих

веществ и материалов строительных конструкций, а также формы конвективной колонки.

Предложенные модификации интегральной и зонной моделей позволят значительно сократить (на 1 – 2 порядка) время расчета на ЭВМ при выполнении многовариантных расчетов термогазодинамики пожара с целью нахождения времени блокирования путей эвакуации ОФП, которое служит основой проверки выполнения условия безопасной эвакуации людей из МЦ.

Разработанные уточненные интегральная и зонная математические модели, новые функциональные зависимости по удельной скорости выгорания твердых горючих материалов и жидкости могут быть использованы при выборе объемно-планировочных и технических решений МЦ, для определения предельных значений огнестойкости строительных конструкций, для расчета величин пожарного риска, для расчета параметров СДУ, в процессе анализа последствий и экспертизе пожаров и т.д.

В среде пакета Matlab на базе интегральной математической модели пожара, учитывающей функционирование СДУ при горении твердых материалов и жидкости при неустановившемся процессе ее горения, разработан программный комплекс, позволяющий моделировать протекание пожаров при разнообразных условиях и сокращать временные затраты при определении величины пожарного риска. Возможности, заложенные в программный комплекс, позволяют использовать разработанную программу при решении различных задач, в том числе научно-исследовательских, проектных и учебных.

Методология и методы исследования. Методы теоретического исследования опирались на фундаментальные законы сохранения массы, энергии и импульса. В диссертации использовались следующие методы теоретического познания: восхождения от абстрактного к конкретному, анализа и синтеза, формализации; методы эмпирического исследования (наблюдение, описание, сравнение, измерения, эксперимент); теория вероятности и статистические методы обработки экспериментальных данных. При переходе от физической модели к натурному объекту в масштабировании коэффициентов регрессионного уравнения применены методы теории подобия.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Комплекс математических моделей расчета динамики ОФП в МЦ.
2. Уточненная зонная математическая модель пожара для расчета динамики ОФП с учетом формы конвективной колонки и функционирования СДУ в различных режимах.
3. Результаты экспериментальных исследований процесса задымления помещения с очагом возгорания и полученных из этих исследований данных по углу полураскрытия конвективной колонки.
4. Аналитические решения системы дифференциальных уравнений уточненной интегральной математической модели и новые аналитические зависимости для расчета динамики задымления помещений здания при пожаре.
5. Определение критического времени продолжительности пожара с учетом неустановившегося процесса горения жидкости и работе СДУ.

6. Регрессионные уравнения динамики изменения удельной массовой скорости при горении твердых материалов и жидкости при неустановившемся процессе ее горения с учетом работы СДУ.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на: 2-ой Всероссийской научно-технической конференции (Воронеж: ВГТА, 2002); международной научно-практической конференции «Технические и социально-гуманитарные аспекты профессиональной деятельности ГПС МЧС России: проблемы и перспективы» (Воронеж: ВПТУ, 2006); первой международной научно-практической конференции «Оценка риска и безопасность строительных конструкций» (Воронеж: ВГАСУ, 2006); II научно-практической конференции «Технические и социально-гуманитарные аспекты профессиональной деятельности ГПС МЧС России: проблемы и перспективы» (Воронеж: ВПТУ, 2007); международном конгрессе «Наука и инновации в строительстве. SIB – 2008. Том 3. Оценка риска и безопасность в строительстве» (Воронеж, 10 – 15 ноября 2008 г.); международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы инновационных систем информатизации и безопасности» (Воронеж: Научная книга, 2009); региональной научно-методической конференции «Непрерывное многоуровневое профессиональное образование: традиции и инновации». (Воронеж, 2010); II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (Воронеж, 2011); международной научно-практической конференции «Методические основы повышения качества образовательной и инновационной деятельности по направлениям подготовки 280700 «Техносферная безопасность» и 280705 «Пожарная безопасность» (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2012); III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (Воронеж, 2012); международной научно-практической конференции «Методические основы повышения качества образовательной и инновационной деятельности по направлениям подготовки 280700 «Техносферная безопасность» и 280705 «Пожарная безопасность» (Москва, 2013); международной научно-практической конференции «Комплексные проблемы техносферной безопасности» (Воронеж: ВГТУ, 2014); IV Международной научно-практической конференции (Белгород, 2015 г.); Recent Advances on Energy, Environment, Ecosystems, and Development Proceedings of the International Conference on Energy, Environment, Ecosystems, and Development (EEED, Barcelona, Spain, 2015); International Symposium «Environmental And Engineering Aspects For Sustainable Living» (Program Abstracts, 1-2 December, 2015).

Практическая значимость работы подтверждена использованием результатов исследования:

– Главным управлением МЧС России по Воронежской области (г. Воронеж) для выполнения комплекса мероприятий, направленных на снижение временных показателей оперативного реагирования на пожарах;

– ООО "Научно-технический центр «Пожарные инновации»" (Московская обл., г. Долгопрудный) для расчета пожарных рисков при реконструкции ФГУК «Государственный Кремлевский дворец» (г. Москва, Кремль, ГКД) и при проектировании объекта "Торгово-развлекательный комплекс «Вегас-II»" (Московская обл., г. Красногорск, п/о «Красногорск-4», Мякининская пойма, 65-66 км МКАД);

– Воронежским институтом ГПС МЧС России в учебно-методическом обеспечении учебной дисциплины «Прогнозирование опасных факторов пожара»;

– ООО «Бастион», ООО «МИНЭПС» (г. Воронеж) при разработке противопожарных мероприятий;

– ООО «Сервис-Безопасность» (г. Воронеж) при оценке величины пожарного риска;

– ООО «ПГС проект» (г. Воронеж) при определении времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в помещениях зданий с массовым пребыванием людей.

– Воронежским государственным архитектурно-строительным университетом в научном, учебном и методическом процессах.

Публикации. Результаты исследования опубликованы в 60 научных работах, в том числе 25 научных статей опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени доктора наук.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов, списка литературы из 169 наименований и приложений; изложена на 257 страницах машинописного текста, содержит 80 рисунков, 9 таблиц и 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ особенностей пожарной опасности МЦ. Приведены примеры крупных пожаров в МЦ, приведших к значительным человеческим жертвам и причинивших большой материальный ущерб (вплоть до полного разрушения здания), как в России, так и за рубежом.

Анализ крупных произошедших пожаров показывает:

- места возникновения пожаров различаются как по этажам зданий, так и по функциональной пожарной опасности помещений, в которых они произошли.

- отступления от строительных норм и норм пожарной безопасности могут привести к катастрофическим последствиям.

Приводятся особенности противопожарной защиты МЦ, в том числе с атриумами, и анализ современного состояния математического моделирования термогазодинамики пожара. Методы определения условий обеспечения безопасной эвакуации людей носят междисциплинарный характер, так как для описания происходящих при пожаре явлений и процессов необходимы знания и

методы исследования математики, химии, общей физики, физической химии и химической физики, механики твердых тел, жидкостей и газов, теплофизики, токсикологии, экономики, а также психологии, физиологии и социологии. Только в комплексном рассмотрении можно описать и получить достоверные результаты при изучении всех сложных явлений, сопровождающих возникновение и развитие пожара с последующей его ликвидацией. Математические модели, описывающие определенные объекты однозначно, с учетом начальных условий и закономерностей протекания изучаемого процесса (детерминированные), можно разделить на четыре группы: аналитические, интегральные, зонные и полевые, которые отличаются друг от друга различным уровнем детализации термогазодинамической картины пожара. Для каждой группы моделей обозначены определяемые параметры, принимаемые предположения и упрощения термогазодинамической картины протекания пожара, условия применимости основных соотношений, схема расчета тепломассообмена в помещении и структуры моделей, достоинства и недостатки.

Отмечено, что одной из важнейших систем пожарной безопасности, обеспечивающей безопасную эвакуацию людей, является СДУ. При моделировании пожаров учет работы СДУ выполняется с помощью задания граничных условий на дымоудаляющих отверстиях в математических моделях расчета термогазодинамики пожара. СДУ может работать в расчетном режиме, когда удаляется из помещения в основном смесь продуктов горения и воздуха, поступающего в конвективную колонку над очагом горения. Однако при большой разнице между температурами припотолочного слоя и воздуха снаружи помещения (в случае СДУ с естественным побуждением) или при достаточно большой скорости движения газового потока на входе в дымоудаляющее отверстие (при работе вентилятора СДУ) эффективность дымоудаления резко снижается из-за того, что воздух из-под припотолочного дымового слоя за счет действия подъемных сил и перепада давлений внутри и снаружи помещения поступает в дымоудаляющее отверстие и препятствует удалению продуктов горения из помещения. В зарубежной литературе вышеуказанное явление получило название “plug-holing”. В интегральной и зонной моделях расход удаляемой смеси газов и дыма в случае СДУ с искусственным побуждением задается производительностью вентилятора СДУ или по давлению разрежения, создаваемому вентилятором. При применении полевой модели необходимо выполнить предварительный расчет по интегральной или зонной моделям с целью приближенного выбора параметров СДУ, что позволяет резко уменьшить количество трудоемких расчетов по полевой модели и избежать режима “plug-holing”.

В выводах по первой главе указана необходимость разработки комплекса математических моделей расчета динамики ОФП в МЦ, включающего уточненные модели пожара, которые учитывают специфику объемно-планировочных и конструктивных решений МЦ, например, наличие атриумов и неустановившуюся скорость выгорания горючих веществ.

Во второй главе представлены основные допущения, уравнения и дополнительные соотношения интегральной, зонной и полевой математических моделей, рассмотрены условия однозначности и методы решения, дан анализ наиболее распространенных в России и за рубежом методов расчета расхода СДУ, предложена методика прогнозирования блокирования путей эвакуации ОФП.

В интегральной математической модели дифференциальные уравнения, выражающие законы сохранения энергии и массы для смеси газов в целом и отдельно для каждого газа и кислорода в помещении, учитывающие действие СДУ и приточной вентиляции приняты общепринятыми, предложенными профессором Кошмаровым Ю.А. Модификация модели заключается в том, прогрев строительных конструкций помещения определяется с использованием нестационарных двухмерных дифференциальных уравнений теплопроводности, и распределение температур по высоте помещения принимается в более подробном виде.

В случае зонного метода расчета динамики ОФП также используются фундаментальные законы природы – законы сохранения энергии, импульса и массы. В зонной математической модели газовая среда помещения разделяется на характерные области (зоны). Количество и размеры зон определяются из условия минимизации в пределах каждой из них неоднородностей полей параметров (температур, концентраций газов и т.д.) газовой смеси или из определяемых задачами исследований других предположений. Предполагается, что между зонами припотолочного слоя и холодного воздуха существует условная граница с бесконечно малой толщиной, при переходе через которую термогазодинамические параметры смеси газов резко изменяются. Принимается, что смесь газов является состоящей из идеальных газов (кислород, азот, окись и двуокись углерода и т.п.), свойства которых при атмосферном давлении близки к идеальным. Течение внутри конвективной колонки считаем стационарным и «квазиодномерным» (осредненные в каждом поперечном сечении колонки термогазодинамические параметры смеси газов в любой момент времени зависят только от высоты колонки и от текущих параметров пожара), то есть «предыстория» процесса не принимается во внимание. Радиационные и оптические свойства смеси газов в помещении учитывают влияние мелкодисперсных частиц дыма через использование оптической плотности дыма. На параметры конвективной колонки, теплоотвода в ограждающие конструкции и тепломассообмена с окружающей средой через открытые проемы геометрическое положение горючего вещества в помещении не влияет.

Основными уравнениями зонной модели являются: дифференциальные уравнения массового расхода, закона сохранения энергии газовой смеси внутри объема конвективной колонки и выше пламенной зоны, обыкновенные дифференциальные уравнения для определения высоты нижней границы припотолочного слоя и закона сохранения массы этого слоя для определения плотности в нем, а также алгебраические равенства, позволяющие рассчитать

массовые расходы и средние температуры смеси газов по высоте колонки, и уравнение состояния идеального газа. Приводятся условия однозначности задачи, которые условно разделены на геометрические, физические, начальные и граничные условия. Полученная в результате разрешающая система уравнений решается численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности.

При рассмотрении полевой математической модели принимаемые допущения позволяют рассматривать газовую среду помещения как вязкий теплопроводный сжимаемый газ. Уравнения модели записаны в ортогональной системе координат и являются нестационарными трехмерными дифференциальными уравнениями в частных производных. Основную группу уравнений составляют: уравнения неразрывности для газовой смеси в целом и для отдельных компонентов этой смеси, уравнения движения в проекции на координатные оси, уравнение энергии, уравнение закона сохранения оптической плотности дыма.

Так как количество искомых параметров превышает число уравнений, то для их решения нужны дополнительные соотношения. Из алгебраических равенств используется локальное состояние смеси газов и уравнение теплофизических параметров газовой смеси. В основные уравнения дифференциальной модели входят коэффициенты турбулентной вязкости (уравнения движения), турбулентной теплопроводности смеси (уравнение энергии) и коэффициент турбулентной диффузии компонентов (уравнение неразрывности). Для определения коэффициента турбулентной вязкости применяется k - ε модель турбулентности, а сам коэффициент определяется по формуле Колмогорова. Расчет коэффициентов турбулентной теплопроводности смеси газов и турбулентной диффузии компонентов смеси проводится с использованием тройной аналогии Прандтля. В этом случае (числа Прандтля и Льюиса равны единице и отсутствуют градиенты давления в потоке газа) уравнения энергии, движения и диффузии становятся тождественными и если существует подобие граничных условий, то есть подобие полей температур, концентраций компонентов смеси и скоростей.

Для расчета радиационного теплопереноса в общем виде используется интегро-дифференциальное уравнение переноса лучистой энергии в смеси газов. Это уравнение решается с помощью достаточно точных и универсальных численных способов, например, стохастическим методом Монте-Карло или зональным методом. Однако эти вышеупомянутые методы являются не вполне совместными с конечно-разностными методами решения дифференциальных уравнений, описывающих перенос энергии, массы и импульса, в полевой модели. Это вызывает необходимость разработки разных численных алгоритмов, что может привести к значительному усложнению программы расчета на ЭВМ. По этой причине применяются различные приближенные методы решения интегро-дифференциального уравнения переноса. Расчет радиационного теплопереноса в смесях газов с использованием простых приближенных методов (диффузионного, потокового или моментного) позволяет преобразовать интегро-дифференциальное уравнение в

дифференциальное уравнение второго порядка в том же виде, как и уравнения энергии и импульса. Точность диффузионного метода возрастает с увеличением оптической плотности смеси газов (число Бугера превышает единицу). Чаще всего для решения задач с горением применяется потоковый метод, к недостаткам которого относится меньшая точность по сравнению с моментным методом. Широкое применение вышеуказанных методов ограничено, так как их точность должна оцениваться сравнением с точным решением исходного уравнения или с соответствующими опытными данными.

В диссертации рассмотрены четыре приближенных метода расчета лучистого теплопереноса: диффузионный метод (метод моментов), оптически прозрачный неизлучающий газ, оптически тонкий слой и оптически толстый слой. Эти модели различаются между собой значениями коэффициента радиационной теплопроводности и источникового члена. Сначала находится оптическая плотность дыма, по которой рассчитываются коэффициенты поглощения, ослабления и излучения. Определение локальных характеристик смеси газов (испускательная, поглощательная и рассеивающая способность смеси газов), содержащей частицы дыма с существенной неоднородностью по форме и размерам, с протекающими сложными процессами дробления частиц, их коагуляции и горения во время движения частиц, является чрезвычайно сложной задачей.

Пламенная зона (область горения) задается с помощью внутренних источников энергии и массы или определяется с привлечением информации об экспериментально измеренных полях температур и других параметров смеси газов. Массовая скорость газификации горючего материала (жидкость или твердое тело) задается полуэмпирическими соотношениями профессора Ю.А. Кошмарова. При горении горючего газа задаются размеры отверстия, через которое газ натекает в помещение, массовый расход и параметры газа (химический состав, температура, давление и т.д.).

Однозначность решения уравнений полевой модели определяется геометрическими, физическими, граничными и начальными условиями задачи. Дифференциальные уравнения (в частных производных) полевой модели решаются с использованием конечно-разностного метода контрольных объемов. Итерационный процесс организован до получения сходящегося решения, при котором отличие параметров смеси газов, полученных на соседних итерациях, не превышает заранее заданной точности.

Рассмотрены наиболее распространенные методы расчета расхода СДУ, используемые в России и за рубежом. Отмечается, что использование формул этих методов для прогнозирования динамики ОФП в высоких помещениях не является корректным из-за невозможности обеспечения выполнения необходимых условий теории подобия, что требует уточнения этих формул к термогазодинамике пожара.

Предложена методика прогнозирования блокирования путей эвакуации с указанием входных и выходных параметров при использовании интегральной, зонной и полевой математических моделей пожара. Критические

продолжительности пожара по отдельным ОФП определяются с использованием анализа динамики ОФП. При этом необходимое время эвакуации составляет:

$$\tau_n = \min \left\{ \tau_{кр}^{п.в.}, \tau_{кр}^T, \tau_{кр}^{т.г.}, \tau_{кр}^{O_2}, \tau_{кр}^{т.п.} \right\}, \quad (1)$$

где $\tau_{кр}^{п.в.}, \tau_{кр}^T, \tau_{кр}^{т.г.}, \tau_{кр}^{O_2}, \tau_{кр}^{т.п.}$ – критические продолжительности пожара, характеризующие потерю видимости, повышенную температуру, повышенные концентрации токсичных продуктов горения, пониженную концентрацию кислорода и критический тепловой поток.

В выводах второй главы отмечены основные отличия предложенных методов расчета от существующих, а также при их использовании значительное (в десятки раз) сокращение трудозатрат на введение исходных данных и время расчета на ЭВМ в случае выполнения многосценарных расчетов динамики ОФП.

В третьей главе рассматривается модификация зонной математической модели расчета термогазодинамики пожара в помещении, учитывающая форму конвективной колонки. Целью исследований является теоретическое и экспериментальное изучение угла полураскрытия конвективной колонки в помещении.

Зонные модели расчета динамики опасных факторов пожара применяются для изучения начальной стадии пожара. На этой стадии распределение параметров газовой смеси в объеме помещения отличается от других стадий пожара существенной неоднородностью. В объеме помещения в этом случае можно условно выделить несколько зон, которые существенно отличаются друг от друга параметрами газовой смеси. По мере развития пожара границы выделенных зон изменяются, и резкое отличие характеристик газовой смеси выравнивается. В принципе, количество зон внутри помещения может быть большим. Так, например, интегральную модель можно рассматривать как однозонную. Используется зонная модель, в которой смесь газов в помещении разделена на три зоны: конвективной колонки, припотолочного слоя и холодного воздуха. Эта модель корректна при условии, когда размеры пламенной области существенно меньше минимального размера помещения, и позволяет учитывать работу систем дымоудаления и приточной вентиляции.

Рассматривается первая фаза начальной стадии пожара, под которой подразумевается отрезок времени, в течение которого нижняя граница припотолочного слоя, непрерывно опускаясь, достигает верхнего края дверного проема. При первой фазе начальной стадии пожара нагретые газы лишь накапливаются в припотолочной зоне. Высота нижней границы припотолочного слоя находится из решения дифференциального уравнения (закон сохранения энергии смеси газов в припотолочном слое) с помощью конечно-разностного метода Рунге-Кутты четвертого порядка точности. Из решений дифференциального уравнения (закон сохранения массы смеси газов в

припотолочном слое) и уравнения состояния идеального газа рассчитываются среднеобъемные температура и плотность смеси газов в припотолочном слое.

Схема теплового баланса в элементарном объеме конвективной колонки представлена на рисунке 1.

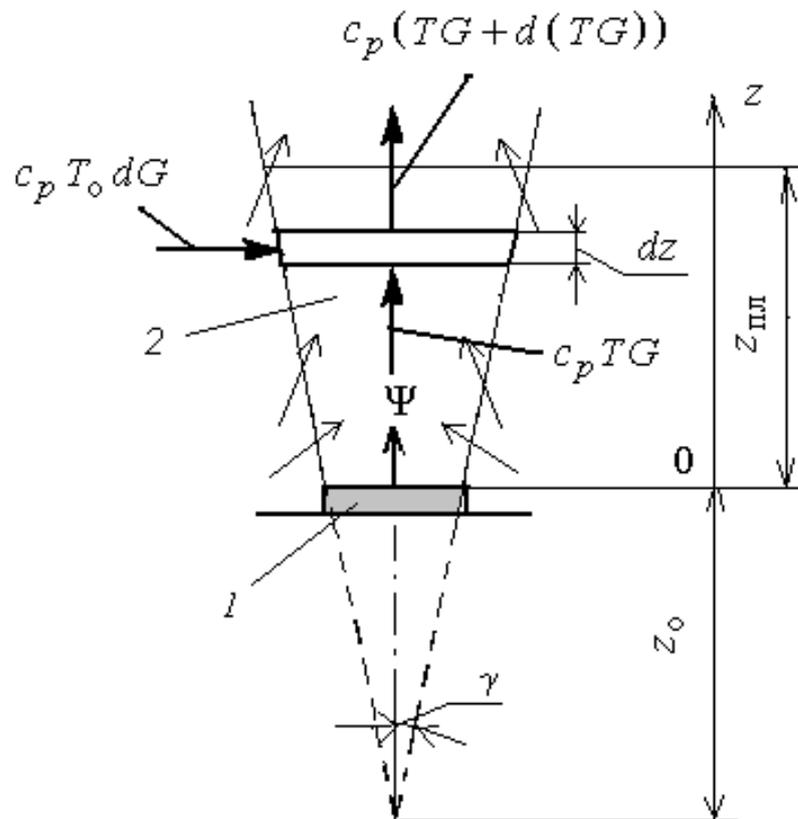


Рисунок 1 – Схема теплового баланса в элементарном объеме конвективной колонки:
1 – горючий материал; 2 – область тепловыделения; $T(K)$ – средняя по сечению температура в конвективной колонке; $G(кг/с)$ – расход (массовый) смеси газов через поперечное сечение колонки, отстоящее по высоте от поверхности горения на расстояние z ; $z_{пл}(м)$ – высота пламенной зоны; $z_0 (м)$ – расстояние от поверхности горючего вещества до фиктивного источника тепла

Уравнение закона сохранения энергии для газовой смеси и дыма, находящейся внутри контрольного объема конвективной колонки с высотой dz , внутри пламенной зоны (области тепловыделения) согласно рисунка 1 имеет вид:

$$c_p (GT + d(GT)) = c_p (GT + T_0 dG) + \frac{Q_{пож}(1 - \chi)}{z_{пл}} dz, \quad (2)$$

где $c_p(Дж/(кг \cdot К))$ – удельная изобарная теплоемкость газа; $T_0(K)$ – начальная температура воздуха в помещении; $Q_{пож}(Вт)$ – тепловая мощность, выделяющаяся в очаге горения; χ – доля от выделившейся в очаге горения тепловой мощности, приходящаяся на поступающий в ограждения тепловой поток из зоны конвективной колонки.

Уравнение закона сохранения импульса для газовой смеси и дыма, находящейся внутри контрольного объема высотой dz конвективной колонки, в соответствии с рисунком 1 имеет вид:

$$\frac{d(\rho w_z^2)}{dz} = -\frac{dp}{dz} - \rho g, \quad (3)$$

где w_z (м/с) – составляющая по вертикальной оси z средней скорости газовой смеси и дыма в поперечном сечении колонки; ρ (кг/м³) – средняя плотность в поперечном сечении колонки; g (м/с²) – ускорение свободного падения; p (Па) – статическое давление в поперечном сечении колонки.

В отличие от рассмотренных ранее работ уравнение (2) учитывает изменение расхода по высоте колонки. Совместно интегрируя уравнения (1) и (2) от $z = 0$ (поверхность горючего вещества) до текущей высоты z , получаем окончательное дифференциальное уравнение для расчета массового расхода через поперечное сечение колонки:

$$C \frac{dG}{dz} = \frac{2A \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{F^3(z)/\pi^3}} G^2 - \left[\frac{\pi}{F(z)} + \frac{2z \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{F^3(z)/\pi^3}} \right] \cdot \frac{A \cdot B \cdot G}{T_0} + g \cdot \left[\rho_0 - \frac{p_0 G}{R \cdot (T_0 G + B \cdot z)} \right] \cdot F(z), \quad (3)$$

где $F(z)$ (м²) – площадь поперечного сечения колонки на высоте z ;

p_0 (Па) – статическое давление в помещении перед пожаром на отметке $z = 0$ (поверхность горючего материала);

$A = \frac{T_0 R}{p_0 \pi}$ (м³/кг); $B = \frac{Q_{\text{пож}}(1 - \chi)}{z_{\text{пл}} c_p}$ (кг·К/(м·с)); $C = \frac{\pi(2G \cdot A + z \cdot A \cdot B/T_0)}{F(z)}$ (м/с) –

размерные параметры.

Величина угла полуоткрытия конвективной колонки может зависеть как от высоты сечения колонки, так и от тепловой мощности, выделяющейся в очаге горения: $\gamma = f(z, Q_{\text{пож}})$. Следовательно, уравнение (3) позволяют учесть при расчете форму конвективной колонки.

С целью изучения процесса распространения смеси продуктов горения, воздуха и дыма при пожаре проведены экспериментальные исследования на макете помещения высотой 1,5 м с поперечным сечением 0,7×0,7 м и регулируемым по высоте потолком. Высоту потолка h принимали равной 1,5 и 1,0 м. Процесс распространения дыма фиксировался с помощью стационарных фотокамер через равные промежутки времени 2 с от начала горения до полного задымления макета помещения. Изменение массы горючего материала фиксировалось с помощью электронных весов с погрешностью измерения 0,1 г. При проведении эксперимента горючий материал (фенолформальдегидная смола с наполнителем из древесной муки) располагали в центре, углу помещения (стеснение двумя поверхностями), а также около стены по ее середине (стеснение одной поверхностью). Во время выполнения

экспериментальных исследований фиксировались следующие параметры: изменение угла полуоткрытия конвективной колонки γ (см. рисунок 1), время опускания дыма до низа макета помещения, изменение массы горючего материала при сгорании.

В ходе проведения эксперимента отмечено различие в характере распространения смеси продуктов горения, воздуха и дыма в зависимости от местоположения очага возгорания. Например, в случае стесненного расположения очага (в углу или у стены) наблюдается более быстрое опускание дыма на противоположной относительно очага возгорания стороне. Этот результат подтверждает данные численных экспериментов, выполненных с использованием полевой модели.

На снимках (рисунок 2), иллюстрирующих течения в экспериментальном объеме на начальной стадии пожара, достаточно четко видно разделение областей объема помещения в соответствии с рисунком 1. Условные границы конвективной колонки на рисунке 2 выделены прямыми линиями.



Рисунок 2 – Особенности течения в экспериментальном объеме на начальной стадии пожара: а, б – $h = 1,5$ м; в – $h = 1,0$ м

Из рисунка 2 видно, что при любом из рассматриваемых местоположений горючего материала, граница конвективной колонки распространяется вверх приблизительно до середины высоты помещения сначала с постоянным углом полуоткрытия, а затем этот угол резко изменяется к нулевому значению. Таким образом, чтобы найти распределение массового расхода по высоте

конвективной колонки из решения дифференциального уравнения (3), необходимо задать следующее условие: при $z \leq z_k$ $\gamma = f(z, Q_{\text{пож}})$; при $z > z_k$ $\gamma = 0$, где z_k – высота от пола помещения, на которой угол полураскрытия становится равным нулю. В первом приближении при $z \leq z_k$ можно принять $\gamma = 11$ град.

Полученные экспериментальные данные подтверждают результаты проведенных теоретических исследований, кратко изложенных выше. Следовательно, использование дифференциального уравнения (3) для расчета массового расхода через поперечное сечение колонки физически более обоснованно, чем применение аналогичных уравнений, основанных на закономерностях распространения неограниченной свободно-конвективной струи. Не учет формы колонки, например, при расчете СДУ с механическим побуждением приводит к существенному завышению требуемого расхода вентилятора. Это может вызвать возникновение явления “plug-holing”, когда в дымоудаляющее отверстие поступает холодный воздух из-под припотолочного слоя дыма и расход удаляемого дыма значительно уменьшается.

В четвертой главе из упрощенных уравнений интегральной математической модели пожара получены формулы для определения критической продолжительности пожара в помещении с очагом возгорания по условиям достижения предельно допустимого значения температуры, концентраций кислорода и токсичных газов; представлены аналитические зависимости для расчета критического времени эвакуации по потере видимости в помещении с очагом возгорания, а также в смежных с ним помещениях на начальной стадии пожара.

Детальное изучение характера изменения параметров газовой среды и протекания процесса горения имеет значение в помещении, в котором непосредственно находится очаг возгорания. При рассмотрении вопроса безопасной эвакуации людей из различных зданий при возникновении пожара в одном или нескольких помещениях этого здания необходимо определить, через какой промежуток времени тот или иной опасный фактор пожара достигнет критического значения как в помещении с источником возгорания, так и в смежных с ним помещениях. В этом случае удобно воспользоваться интегральной моделью пожара, описывающей состояние газовой среды в общем виде, и как самой доступной в получении решения, в ряде случаев аналитического.

При рассмотрении начальной стадии пожара разрешающая система принимается в виде пяти обыкновенных дифференциальных уравнений пожара, которые предложены в работах профессора Кошмарова Ю.А.: уравнение материального баланса для смеси газов, находящихся в помещении, вытекающее из уравнения неразрывности; уравнение энергии пожара, которое выводится на основе первого закона термодинамики; уравнения баланса оптического количества дыма, масс кислорода и токсических продуктов горения. Эта система дифференциальных уравнений относительно шести неизвестных функций ($\rho_m(\tau)$ – среднеобъемная плотность газовой среды в целом (кг/м³); $p_m(\tau)$ – среднеобъемное давление (Н·м²); $T_m(\tau)$ – среднемассовая

температура (К); $\mu_m(\tau)$ – среднеобъемная оптическая плотность дыма (Нп/м); $\rho_m^{O_2}(\tau)$ – среднеобъемная плотность кислорода (кг/м³); $\rho_m^{m.z.}(\tau)$ – среднеобъемная плотность токсичных газов (кг/м³)) замыкается алгебраическим усредненным уравнением состояния газовой среды в помещении, которое аналогично уравнению Клайперона. Константы интегрирования разрешающей системы обыкновенных дифференциальных уравнений определяются начальными условиями до развития пожара в помещении.

На начальной стадии развития пожара можно предположить: отсутствие поступления воздуха извне; постоянное среднее давление, равное давлению наружного воздуха; незначительные изменения средней температуры и концентрации кислорода; коэффициент теплопотерь (отношение теплового потока, поглощаемого ограждающими конструкциями и излучаемого через проемы, к тепловыделению) есть величина постоянная. С учетом этого уравнение энергии пожара преобразуется к алгебраическому виду и позволяет вывести формулу расхода выходящих из помещения газов в рассматриваемый момент времени. Оставшаяся система четырех дифференциальных уравнений не является связанной, решение каждого из них можно искать отдельно.

Дифференциальные уравнения, описывающие изменения среднеобъемной плотности, концентраций кислорода и токсичных газов являются с разделяющимися переменными. Интегрированием в соответствующих пределах с учетом начальных условий получены аналитические выражения для определения критической продолжительности пожара в помещении с очагом возгорания по условию достижения предельно допустимых значений температуры $T_{кр}$, концентрации кислорода $\rho_{кр}^{O_2}$ и токсичных газов $\rho_{кр}^{m.z.}$

$$\tau_{кр}^T = n \sqrt{\frac{V}{AC} \ln \frac{T_{кр}(1 - C\rho_0)}{T_{кр} - C\rho_0 T_0}}, \quad (4)$$

$$\tau_{кр}^{O_2} = n \sqrt{\frac{V}{AC\eta} \ln \left(\frac{L_{O_2} + C\rho_0^{O_2}}{L_{O_2} + C\rho_{кр}^{O_2}} \right)}, \quad (5)$$

$$\tau_{кр}^{m.z.} = n \sqrt{\frac{V}{AC\eta} \ln \left(\frac{L_{m.z.}}{L_{m.z.} - C\rho_{кр}^{m.z.}} \right)}. \quad (6)$$

Здесь: V (м³) – объем помещения с очагом возгорания; ρ_0 (кг/м³), T_0 (К) – плотность и температура среды до начала пожара; L_{O_2} (кг/кг) – потребление кислорода (масса кислорода, необходимая для сгорания 1 кг горючего вещества); $L_{m.z.}$ (кг/кг) – количество выделяемых при горении токсичных газов на единицу массы горючего материала; η – коэффициент полноты сгорания; $A = \frac{\pi}{3} \psi_{y\partial} v_{л}^2$, $n = 3$ – при круговом распространении пламени; $A = b \psi_{y\partial} v_{л}$, $n = 2$

– при распространении пламени полосой; $\psi_{y\delta}$ (кг/м²·с) – удельная массовая скорость газификации горючего вещества; v_l (м/с) – скорость (линейная) распространения пламени по поверхности горючего вещества;

$C = \frac{\eta Q_n^p (1 - \varphi) + i_3}{c_{pm} \rho_0 T_0}$ – формальный размерный параметр; Q_n^p (Дж/кг) – низшая

рабочая теплота сгорания горючего материала; φ – коэффициент теплопотерь; i_3 (Дж/кг) – энтальпия продуктов газификации (пиролиз, испарение) горючего материала; c_{pm} (Дж/кг·К) – удельная изобарная теплоемкость газовой среды.

В начальной стадии развития пожара не происходит резкого изменения таких параметров, как средняя температура, концентрации кислорода и токсичных газов. Определяющим фактором критического времени эвакуации людей является потеря видимости, которая резко снижает ориентацию людей в пространстве и оказывает на них значительное психологическое воздействие. При этом промежуток времени достижения критического количества дыма в помещении с очагом возгорания и смежных с ним можно условно разбить на два. В течение первого интервала достигается критическая концентрация дыма в помещении с очагом возгорания, в течение второго эта насыщенная газовая смесь заполняет смежные помещения от потолка до некоторой критической высоты от уровня пола $h_{кр}$. Время достижения критической концентрации дыма $\mu_{кр}$ в помещении с очагом возгорания можно определить аналогично (4) - (6)

$$\tau_{кр}^{\delta} = n \sqrt{\frac{V}{AC} \ln \left(\frac{D}{D - C \mu_{кр}} \right)}, \quad (7)$$

где D (Нп·м²/кг) – дымообразующая способность горючего материала.

С момента времени $\tau_{кр}^{\delta}$ образующиеся при горении газы будут выталкиваться из помещения с очагом возгорания через проемы в смежные помещения (коридоры, соседние комнаты и т.д.) уже плотно задымленную газовую смесь. Как имеющая более высокую температуру, эта смесь поднимется к потолку и начнет заполнять смежные помещения, опускаясь к полу. Критический объем $V_{кр}$ всех помещений, смежных с комнатой, охваченным пожаром (на этаже, в отсеке и т.д.) вычисляется как произведение площади S_{Σ} всех смежных помещений, на расчетную высоту h_p

$$V_{кр} = S_{\Sigma} \cdot h_p, \quad (8)$$

где $h_p = h - h_{кр}$; h – высота помещений.

С помощью выражения для расхода выходящих из помещения с очагом возгорания газов определяется объем, который масса выталкиваемых газов заполнит за некоторый конечный промежуток времени. Отсюда получена формула для определения критического промежутка времени $\tau_{кр}^V$, в течение которого плотная дымовая завеса заполнит объем $V_{кр}$:

$$\tau_{кр}^V = \sqrt[n]{\frac{c_{pm}\rho_0 T_0 S_{\Sigma} h_p}{A[\eta Q_n^p (1 - \varphi) + i_3]}}. \quad (9)$$

Окончательно критическое время эвакуации по потере видимости принимает вид:

$$\tau_{кр} = \tau_{кр}^{\partial} + \tau_{кр}^V = \sqrt[n]{\frac{V}{AC} \ln\left(\frac{D}{D - C\mu_{кр}}\right)} + \sqrt[n]{\frac{S_{\Sigma} h_p}{AC}}. \quad (10)$$

При проведении численного эксперимента установлено, что влияние энтальпии продуктов газификации горючего материала на величину среднеобъемной плотности дыма весьма незначительно. Так, в представленной ниже таблице 1 приведены значения μ_m в различные моменты времени, посчитанные для древесины с учетом энтальпии и без учета этой величины при прочих равных параметрах и круговом распространении пламени. Анализ полученных табличных данных позволяет сделать вывод о возможности пренебрежения в дальнейших расчетах энтальпией продуктов газификации горючих материалов ($i_3=0$).

Таблица 1 – Значения μ_m в различные моменты времени

τ, c	0	15	30	45	60
μ_m при $i_3=1,8 \cdot 10^6$	0	0,0269	0,2127	0,6987	1,5717
μ_m при $i_3=0$	0	0,0269	0,2132	0,7042	1,6012

Исходя из результатов теоретических и экспериментальных исследований, можно предположить подобие поля температур и поля концентрации дыма. Тогда по аналогии с формулой распределения температуры, предложенной В.Н. Тимошенко, распределение плотности дыма по высоте помещения определяется выражением вида

$$\mu^z = \mu_0 + (\mu_m - \mu_0) \frac{z}{h} e^{-4,8 \frac{z}{h}}, \quad (11)$$

где μ_0 – начальное значение плотности дыма; μ^z – плотность дыма на высоте z от уровня пола; h – высота помещения.

На рисунке 3 представлено распределение плотности дыма по высоте помещения до рабочей высоты 1,8 м при круговом распространении пламени в помещении объемом 60 м³ в различные моменты времени.

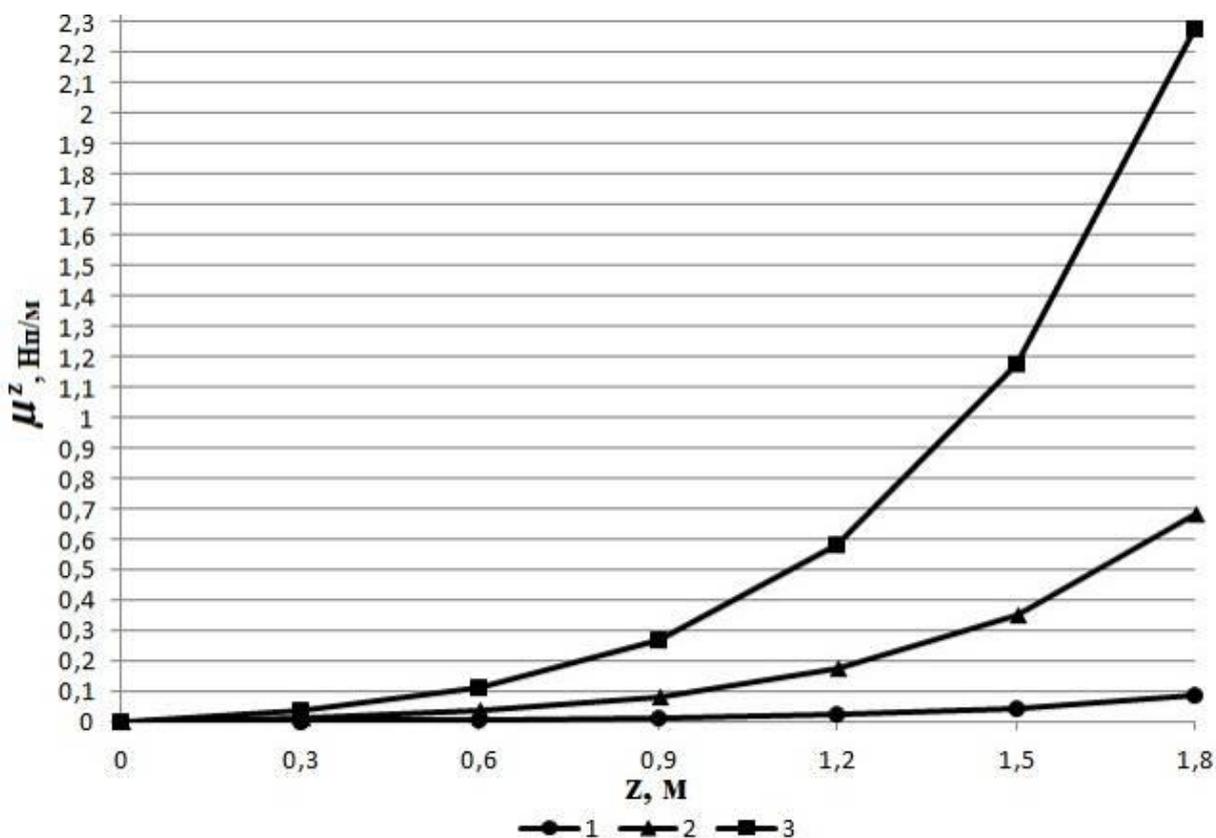


Рисунок 3 – Распределение плотности дыма по высоте помещения до рабочей высоты 1,8 м при круговом распространении пламени в помещении объемом 60 м³ в моменты времени: $\tau = 10$ с (кривая 1), $\tau = 20$ с (кривая 2), $\tau = 30$ с (кривая 3)

Равенство (11) позволяет определить период времени, в течение которого плотность дыма достигнет своего критического значения $\mu_{кр}^z$ на уровне z от уровня пола:

$$\tau_{кр}^{\partial}(z) = \sqrt[n]{\frac{V}{AC} \ln \left(\frac{D}{D - C(\mu_{кр}^z - \mu_0) \frac{h}{z} e^{-4,8 \frac{z}{h}}} \right)}. \quad (12)$$

В работе построены графические зависимости при различных параметрах, входящих в исходные равенства. Дан анализ условий применимости представленных аналитических формул и полученных с помощью этих равенств графических зависимостей.

В пятой главе представлена разрешающая система дифференциальных уравнений модифицированной интегральной модели пожара в условиях работы СДУ с учетом ее времени включения и объемного расхода. При этом предполагается, что газообмен через естественную вентиляцию осуществляется в двустороннем направлении, а СДУ работает в одностороннем – на вытяжку. Учитывается также конвективная и радиационная составляющие процесса теплообмена в ограждающие конструкции.

Для получения решения представленной системы уравнений к ней необходимо присоединить дополнительное равенство, которое описывает в динамике удельную массовую скорость выгорания твердых материалов и жидкости при неустановившемся процессе ее выгорания, а также учитывает функционирование СДУ. В работе представлен анализ формул для расчета динамики удельной массовой скорости выгорания жидкости и результатов соответствующих экспериментальных исследований, известных из литературы.

При численном моделировании физических процессов, протекающих в условиях пожара в помещении, в программном комплексе Mathworks – MATLAB были реализованы два алгоритма решения: согласно интегральной математической модели профессора Ю.А. Кошмарова, согласно разработанной модифицированной интегральной математической модели, учитывающей работу СДУ. В ходе выполнения численного эксперимента варьировались следующие параметры, влияющие на протекание физических процессов при пожаре: среднemasсовая температура газовой среды; среднеобъемная плотность смеси газов; среднеобъемные плотности компонентов газовой среды (кислород и токсичные газы); массовые расходы уходящих газов (продуктов горения) и поступающего воздуха через естественную вентиляцию; массовый расход уходящих газов через СДУ; удельная массовая скорость выгорания жидкости; вид функции режима пожара. Результаты численных вычислений систематизированы, для этой цели численный эксперимент разбит на серии, для которых используемые равенства указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Равенства, используемые для численных вычислений

№ серии	Интегральная математическая модель пожара	Удельная массовая скорость выгорания жидкости
1	модель Ю. А. Кошмарова	$\psi_{y\partial} = K \psi_{y\partial}^0 - (1 - K) \frac{0,23(G_a + G_{ex})}{L_{O_2} \cdot S_f}$
2	модифицированная модель	
3	модель Ю. А. Кошмарова	$\psi = \begin{cases} \psi_{y\partial} \cdot \sqrt{\tau/\tau_*}, & \text{при } \tau \leq \tau_*; \\ \psi_{y\partial}, & \text{при } \tau > \tau_*, \end{cases}$
4		$\psi_{y\partial} = \begin{cases} \psi_{y\partial}^0 \cdot (0,3 + 0,7\sqrt{\tau/\tau_*}), & \text{при } \tau \leq \tau_*; \\ \psi_{y\partial}^0, & \text{при } \tau > \tau_*, \end{cases}$

В формулах таблицы 2: $\psi_{y\partial}^0$ (кг/м²·с) – удельная скорость выгорания на открытом воздухе; G_a , G_{ex} (кг/с) – массовые расходы поступающего воздуха через естественную и приточную вентиляцию соответственно; S_f (м²) – площадь горения; K – функция режима пожара, описываемая эмпирическим уравнением; τ_* – время стабилизации горения.

На рисунках 4 и 5 представлены графики изменения среднеобъемной плотности газовой среды в целом и среднemasсовой температуры в зависимости

от времени горения с учетом работы СДУ. Наблюдаемое расхождение результатов вычислений, выполненных по зависимостям 1 и 2 серии, объясняется тем, что в первые 90 с развития пожара СДУ находится в выключенном состоянии. Отличие кривых, полученных в соответствии с 1 и 3, 4 сериями, обусловлено использованием различных выражений для удельной массовой скорости выгорания жидкости в соответствии с таблицей 2.

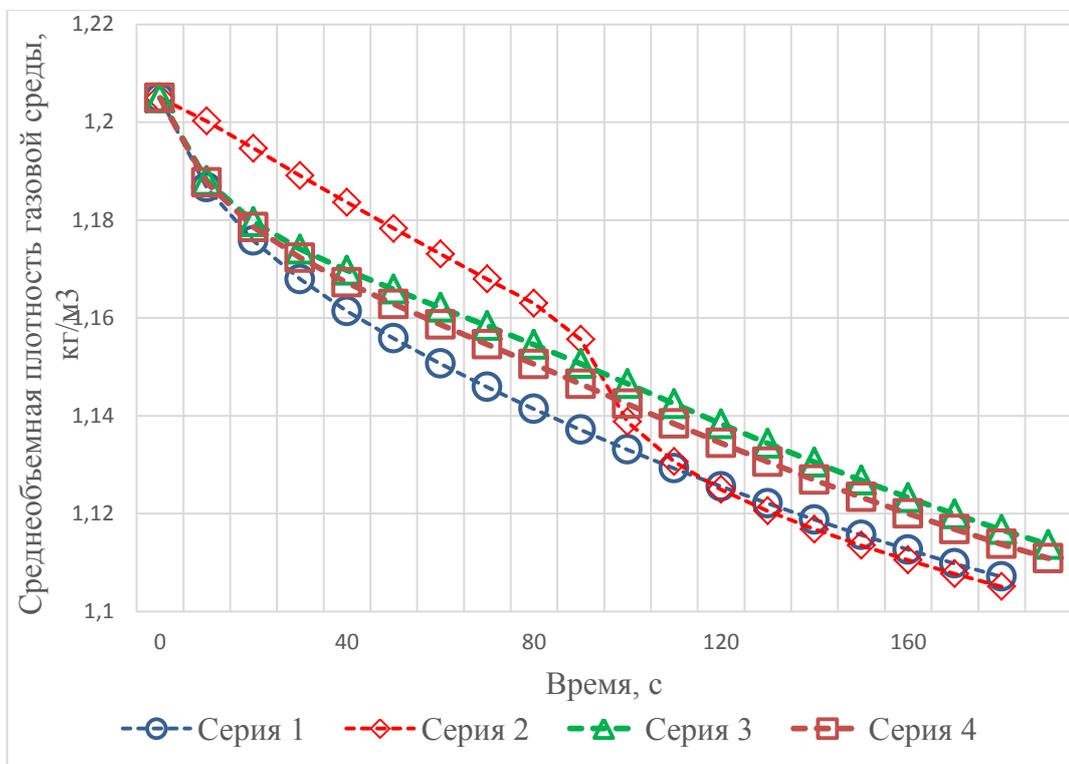


Рисунок 4 – Средняя по объему плотность газовой среды от времени

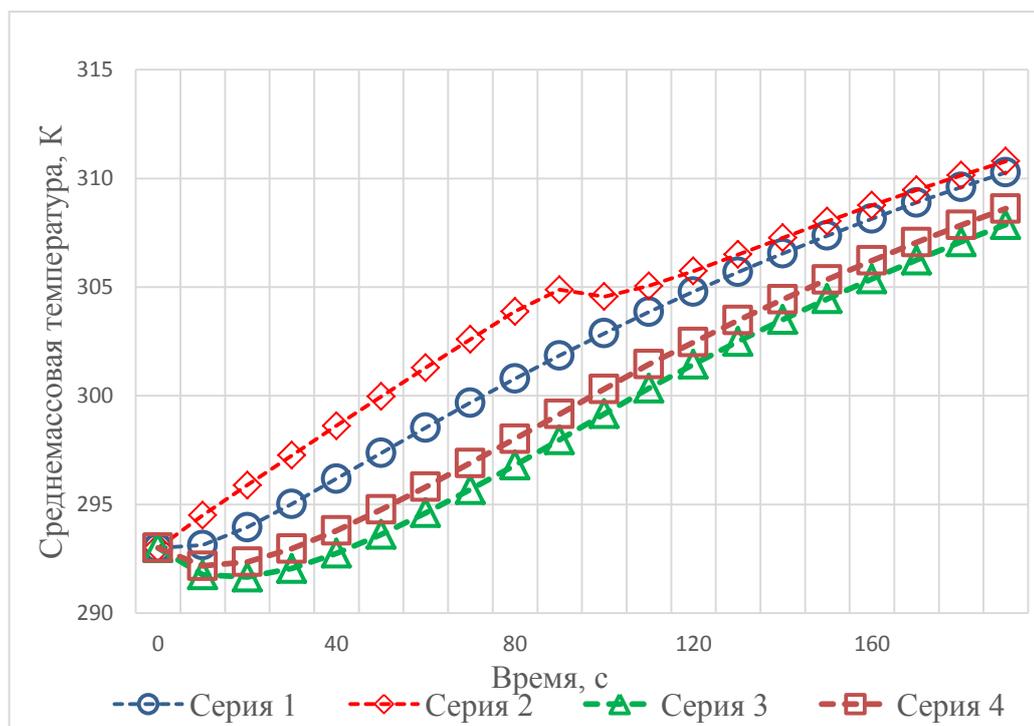


Рисунок 5 – Среднemasсовая температура газовой среды

Анализ численных результатов показывает, что время включения и объемный расход СДУ практически не оказывают влияние на динамику удельной массовой скорости выгорания этилового спирта, что находится в некотором противоречии с протекающими при этом физическими явлениями. Чтобы применить полуэмпирические зависимости для массовой скорости выгорания пожарной нагрузки, необходимо экспериментальным путем получить установившуюся удельную массовую скорость выгорания жидкости и время стабилизации процесса горения в случае заданных конкретных условий.

В шестой главе представлены результаты экспериментальных исследований с целью получения регрессионных уравнений, описывающих зависимость удельной массовой скорости выгорания твердых материалов и жидкости от объемного расхода СДУ и времени ее включения. При проведении экспериментальных исследований по определению закона изменения неустановившейся удельной массовой скорости выгорания горючих материалов была разработана и выполнена физическая модель помещения, представленной на рис. 6.

С целью получения достоверных регрессионных уравнений, а также сокращения количества опытов при определении последовательности проведения экспериментальных исследований был применен композиционный план Бокса-Уилсона, имеющий 3-ий порядок и дополнение в виде «звездных точек». С помощью выбранного плана выполнена первичная статистическая обработка результатов проведенных серий эксперимента. Окончательно регрессионное уравнение, описывающее динамику удельной массовой скорости выгорания твердых материалов с учетом времени включения и объемного расхода СДУ, принимает вид:

$$\psi_s = (8,4 + 3 \cdot k_1 - 0,14 \cdot k_2 + 0,85 \cdot k_3 + 0,39 \cdot k_1 k_2 + 1,13 \cdot k_1 k_3 - 0,23 \cdot k_2 k_3 - 1,21 \cdot k_4 + 2,12 \cdot k_5 + 2,64 \cdot k_6) \cdot 10^{-3}, \quad (13)$$

где

$$k_1 = \frac{\tau - 90}{70}; \quad k_2 = \frac{\tau^* - 50}{24}; \quad k_3 = \frac{W_g - 0,018}{0,006}; \quad k_4 = \left(\frac{\tau - 90}{70} \right)^2 - 0,73;$$

$$k_5 = \left(\frac{\tau^* - 50}{24} \right)^2 - 0,73; \quad k_6 = \left(\frac{W_g - 0,018}{0,006} \right)^2 - 0,73;$$

τ^* (с) – время срабатывания СДУ; W_g ($\text{м}^3/\text{с}$) – объемный расход СДУ, определяемый равенством $W_g = \frac{\pi d_g^2}{4} \cdot v_g$, d_g (м) – диаметр вытяжного отверстия; v_g (м/с) – среднее значение скорости.

Чтобы в полученном уравнении (13) было возможным учитывать в первом приближении физико-химические свойства горючего материала, вычтем из правой части среднее значение начальной удельной массовой скорости горения этого материала.



Рисунок 6 – Модель помещения с системой дымоудаления

Приходим к уравнению вида:

$$\psi_s = \psi_{s0} + (k_0 + 3 \cdot k_1 - 0,14 \cdot k_2 + 0,85 \cdot k_3 + 0,39 \cdot k_1 k_2 + 1,13 \cdot k_1 k_3 - 0,23 \cdot k_2 k_3 - 1,21 \cdot k_4 + 2,12 \cdot k_5 + 2,64 \cdot k_6) \cdot 10^{-3}, \quad (14)$$

где ψ_{s0} , кг/(м²·с) – начальное значение удельной массовой скорости горения твердого горючего материала; $k_0 = 8,4 - \psi_{s0} \cdot 10^3$.

Визуальное сравнение расположения экспериментальных точек и регрессионной кривой показано на рисунке 7.

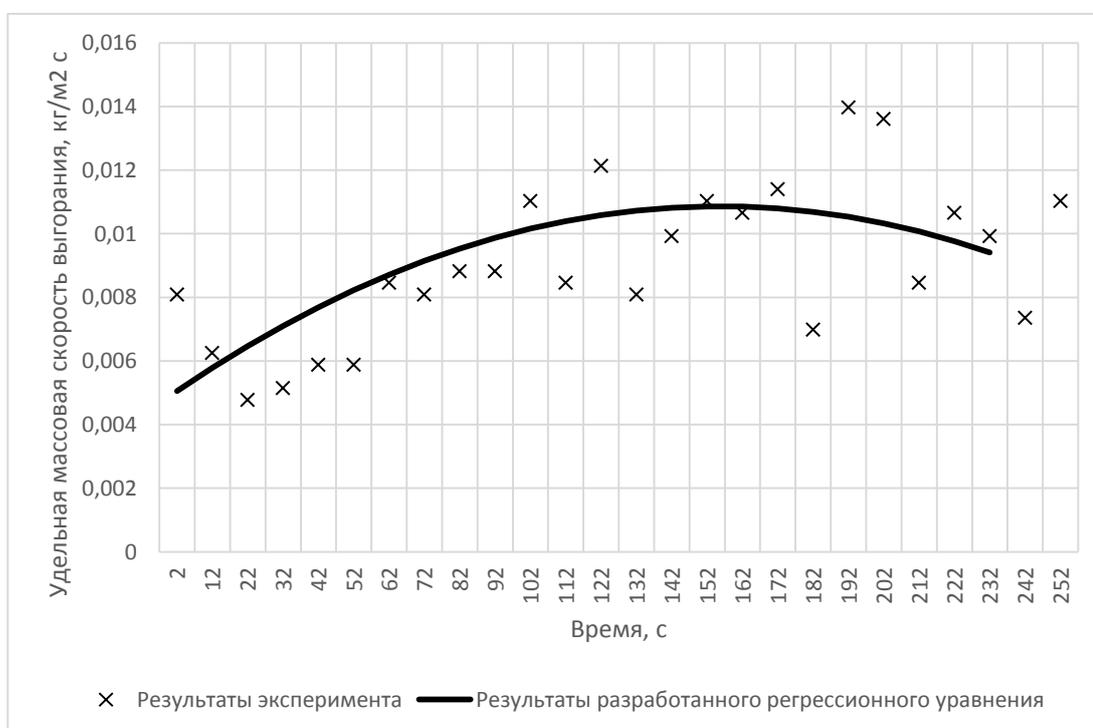


Рисунок 7 – Зависимость удельной массовой скорости горения твердого материала от времени

При переходе от физической модели к натурному объекту в масштабировании коэффициентов регрессионного уравнения применены методы теории подобия.

На базе модифицированной интегральной математической модели, предложенной в главе 5, с учетом допущений, характерных для начальной стадии развития пожара, получены аналитические зависимости, описывающие законы изменения основных параметров газовой среды с применением также разработанного регрессионного уравнения динамики удельной массовой скорости выгорания жидкости при неустановившемся процессе горения. Выполнено сравнение графических зависимостей для законов изменения с течением времени основных параметров газовой среды, полученных численным решением системы разрешающих уравнений модифицированной интегральной математической модели (серия № 5) и с помощью указанных аналитических зависимостей (серия № 6). На рисунке 8 представлены соответствующие результаты для среднеобъемной парциальной плотности кислорода в газовой среде.

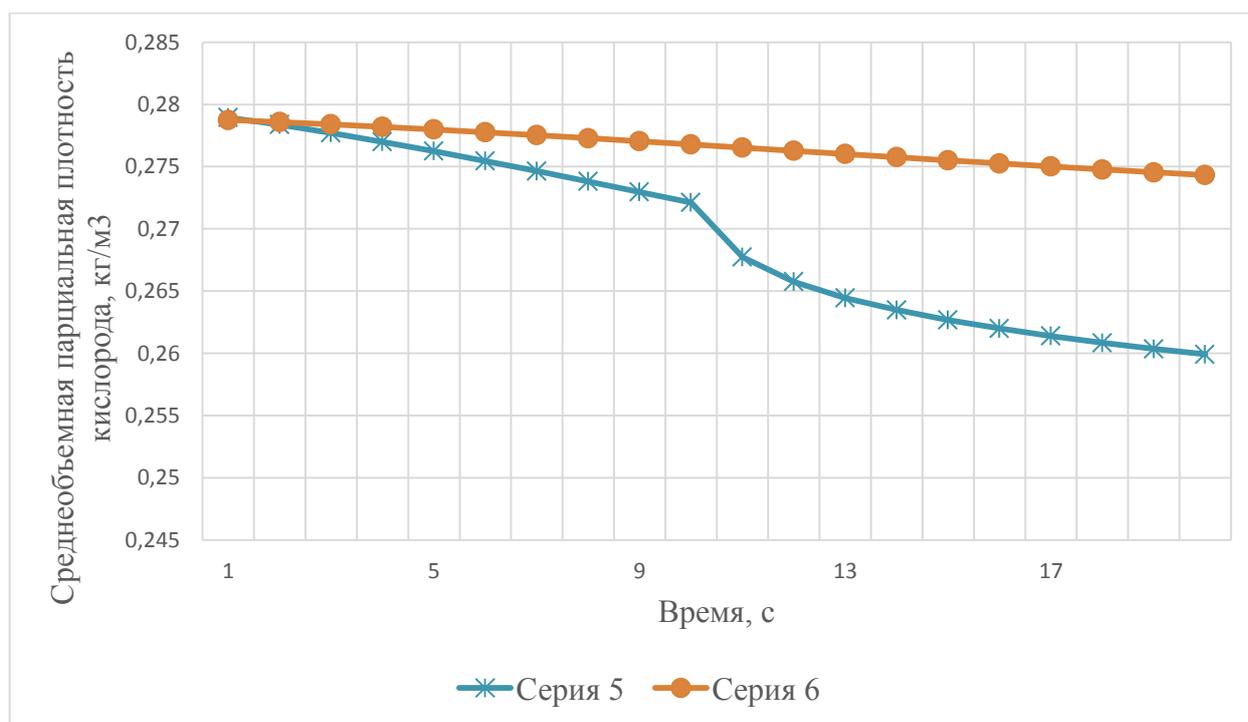


Рисунок 8 – Среднеобъемная парциальная плотность кислорода в газовой среде от времени

На начальной стадии развития пожара имеет место удовлетворительная сходимость результатов. Наблюдаемое при увеличении временного интервала расхождение кривых объясняется тем, что при получении аналитических зависимостей были приняты ряд гипотез и упрощений, имеющих место лишь на начальной стадии развития пожара. Следовательно, с увеличением времени, достоверность численных данных, полученных с помощью аналитических зависимостей, уменьшается.

На базе модифицированной интегральной математической модели пожара, учитывающей функционирование СДУ при неустановившемся процессе горения жидкости, в среде пакета Matlab разработан программный комплекс. Он позволяет рассчитывать значения основных параметров газовой среды при протекающих тепломассообменных процессах пожара, а также вычислить необходимое время для эвакуации людей, которое имеет определяющее значение при оценке величины пожарного риска.

В седьмой главе рассмотрены примеры практического решения задач пожаробезопасности для МЦ. Численное моделирование выполнено с использованием зарегистрированной в Федеральной службе по интеллектуальной собственности программы для ЭВМ «Интегральные, зонные и полевые методы расчета динамики опасных факторов пожара», № 2006614238, разработанной профессором С.В. Пузачем.

Приводится расчет пожарных рисков для реконструкции Государственного Кремлевского Дворца с учетом работы СДУ, особенности термогазодинамики пожара в многофункциональном торговом комплексе ООО «МЕТРО Кэш энд Керри», в атриуме 5-этажного здания торгово-развлекательного комплекса «Галерея» и в подземной автостоянке торгово-развлекательного комплекса «Вегас II». Для каждого объекта приведены схемы помещений, наиболее опасные сценарии развития пожара, характерные поля параметров газовой среды помещения (температура, оптическая плотность дыма, скорость и направления течения) в продольном и поперечном сечениях для конкретных моментов времени.

На рисунке 9 показаны характерные поля параметров газовой среды помещения (температура, оптическая плотность дыма, скорость и направления течения) в продольном разрезе, проходящем через место возгорания, в зрительном зале Государственного Кремлевского Дворца через 360 с от начала пожара. На рисунке 10 представлены поля дальности видимости в плоскости, параллельной полу в многофункциональном торговом комплексе ООО «МЕТРО Кэш энд Керри», на высоте 2 м от пола (высота рабочей зоны), через промежутки времени в 480, 600, 720 и 840 секунд от начала пожара.

Анализ полученных данных по динамике ОФП позволяет сделать вывод о том, что в атриумах многофункциональных центров последовательность блокирования ОФП эвакуационных выходов зависит от особенностей термогазодинамической картины пожара, которая определяется расположением источника возгорания и объемно-планировочными решениями помещений. Наличие в МЦ с атриумами помещений различных классов функциональной пожарной опасности, существенно отличающихся характеристиками пожарной нагрузки и объемно-планировочными решениями, приводит к качественному и количественному отличию термогазодинамической картины пожара от общепринятых представлений. Так, для помещений большой площади и маленькой высоты (например, встроенных автостоянок, торговых залов и т.д.) припотолочный слой не является плоскопараллельным перекрытием, равномерно прогретым и задымленным.

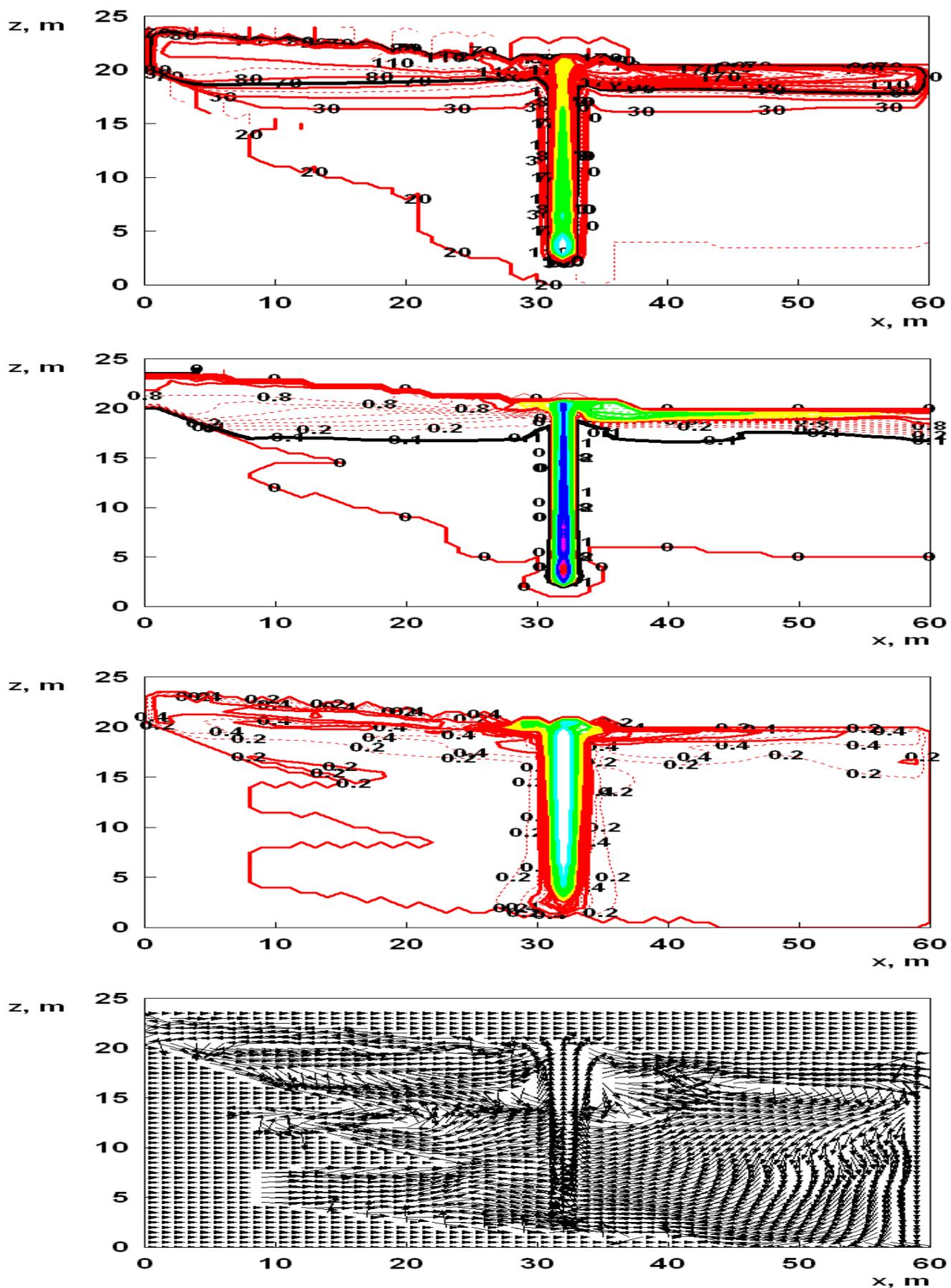


Рисунок 9 – Поля параметров газовой среды помещения в продольном сечении зрительного зала через 360 с от начала пожара

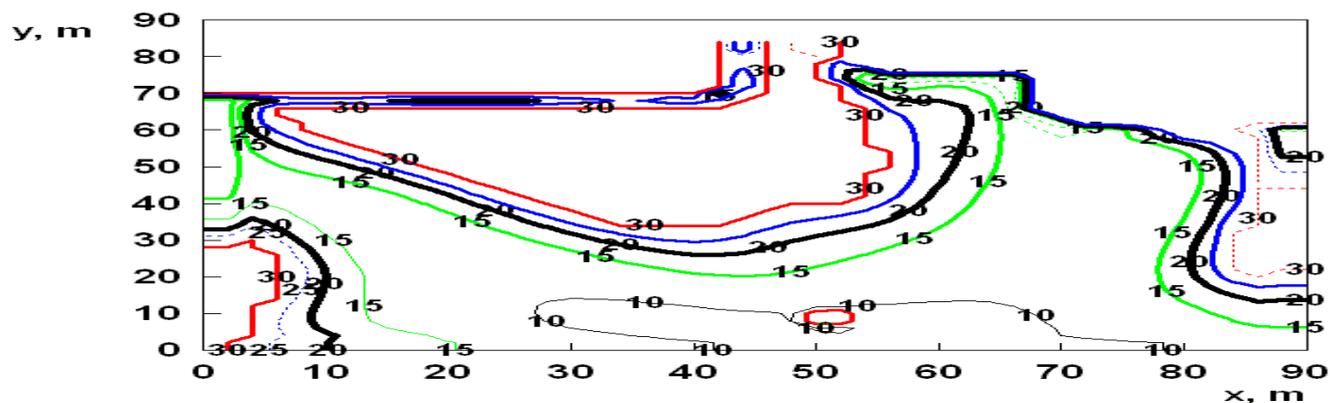
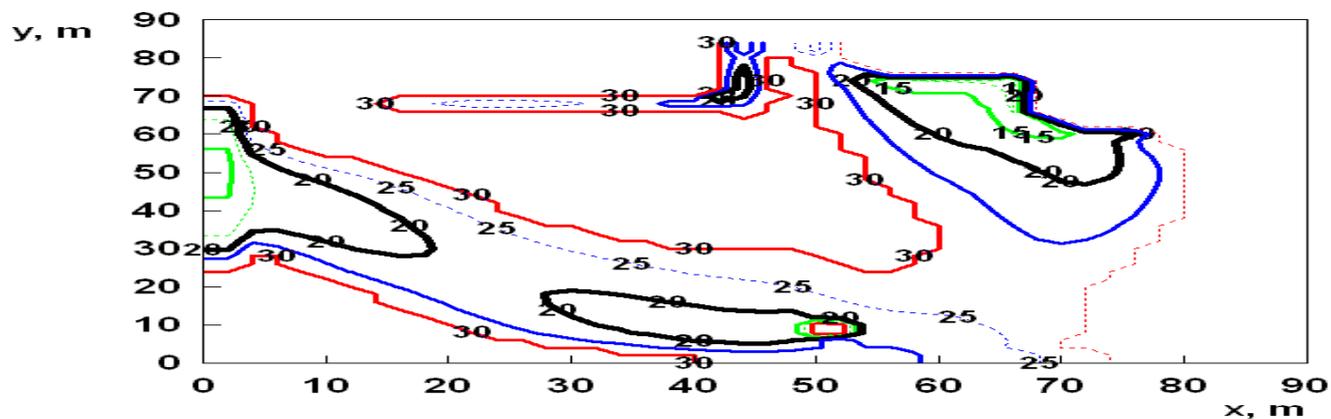
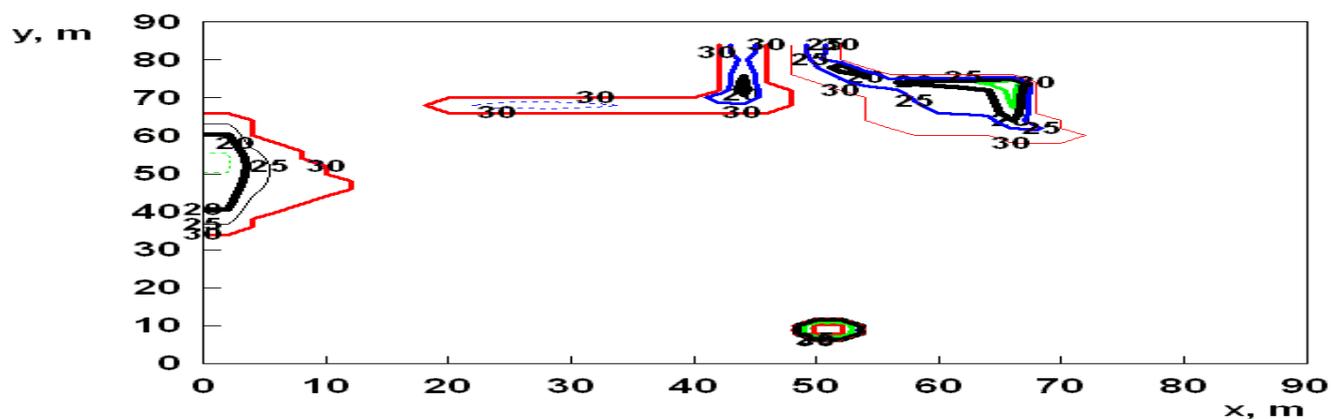
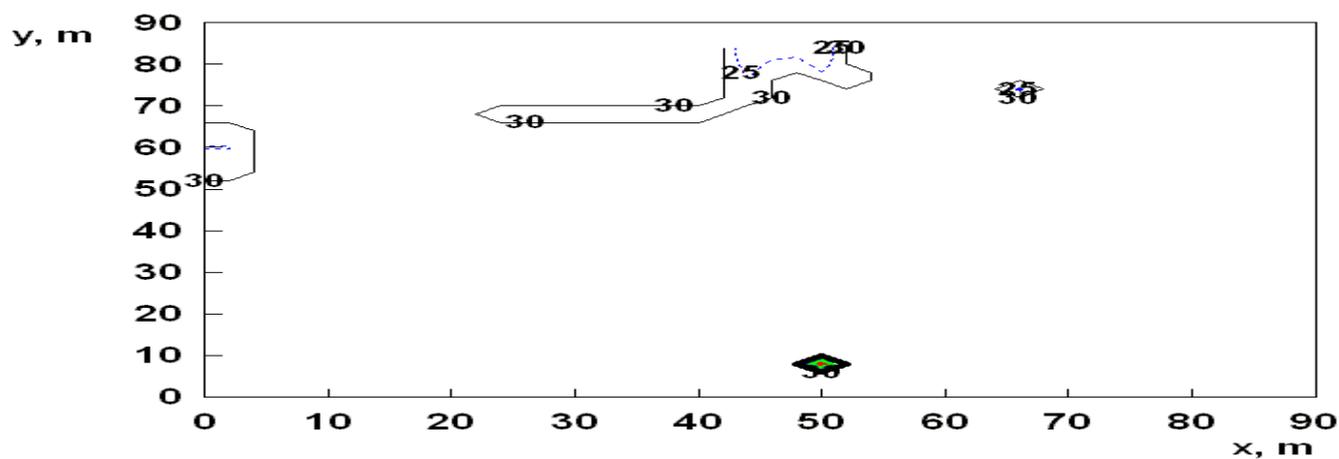


Рисунок 10 – Поля дальности видимости в плоскости, находящейся на высоте 2 м от пола, через 480, 600, 720 и 840 с от начала возгорания

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Наличие в МЦ помещений различных классов функциональной пожарной опасности, существенно отличающихся характеристиками пожарной нагрузки и объемно-планировочными решениями, приводит к качественному и количественному отличию термогазодинамической картины пожара от общепринятых представлений. Разработанные в диссертации научные основы для создания комплекса математических моделей расчета динамики ОФП, определяющего время блокирования путей эвакуации ОФП при работе СДУ, позволяют достоверно спрогнозировать основные закономерности термогазодинамической картины пожара, что приводит к снижению пожарного риска в МЦ за счет оптимизации объемно-планировочных и конструктивных решений МЦ.

2. Разработанная модифицированная зонная модель учитывает влияние ограждающих конструкций помещения на параметры конвективной колонки. Предложенное дифференциальное уравнение (3) для расчета массового расхода через поперечное сечение колонки физически более обоснованно, чем применение аналогичных уравнений, основанных на закономерностях распространения неограниченной свободно-конвективной струи. Выполненные экспериментальные исследования на макете помещения с учетом расположения горючего материала относительно стен экспериментального объема показали достаточную для практических расчетов точность предложенной модели. В рассмотренных примерах учет распределения величины угла полураскрытия колонки по высоте помещения привел к увеличению среднеобъемной температуры припотолочного газового слоя в 2 раза по сравнению с расчетами, выполненными с использованием традиционного подхода.

3. На основе интегральной модели получены новые аналитические зависимости для определения критической продолжительности пожара на начальной стадии его развития по условиям достижения величинами ОФП их критических значений в помещении с очагом возгорания и в смежных с ним помещениях. Проведенные в процессе исследования численные эксперименты позволяют сделать вывод о незначительном влиянии энтальпии продуктов газификации горючего материала на величину среднеобъемной плотности дыма. Более интенсивный рост числовых значений среднеобъемной плотности дыма в помещении с очагом возгорания наблюдается при круговом распространении пламени по сравнению с распространением пламени полосой. Показано, что с увеличением времени пожара интенсивность распределения плотности дыма по высоте помещения возрастает. На интенсивность распределения плотности дыма в значительной мере сказываются объем помещения, охваченного пожаром, а также степень огнестойкости здания.

4. Проведенные экспериментальные исследования динамики удельной массовой скорости выгорания в условиях горения твердых горючих материалов и неустановившегося процесса выгорания жидкости с учетом работы СДУ, времени ее включения и объемного расхода позволили получить регрессионные

уравнения, которые используются в аналитических зависимостях расчета значений ОФП для начальной стадии развития пожара.

5. На базе уточненной интегральной математической модели пожара выполнены теоретические исследования по изучению влияния работы СДУ на динамику ОФП с учетом объемного расхода и времени включения вытяжной вентиляции в условиях горения твердых горючих материалов и неустановившегося процесса выгорания жидкости. При этом показано, что аналитические зависимости для удельной массовой скорости выгорания жидкости могут содержать погрешности, если при их получении не учитывать неустановившийся процесс горения, объемный расход и время включения СДУ. Как следствие, это приводит к переоценке или недооценке пожарной опасности МЦ в целом. Выполнено сравнение результатов, полученных при численном решении неупрощенной системы разрешающих уравнений, и с помощью аналитических зависимостей с учетом гипотез и соотношений, характерных для начальной стадии развития пожара. При этом в задаче масштабирования коэффициентов регрессионного уравнения применены методы теории подобия, выполнена статистическая проверка гипотезы об однородности дисперсий в нескольких экспериментальных выборках, проведен регрессионный и корреляционный анализ. Приведено сравнение экспериментальных данных с линией регрессии, показавшее ее достаточную для практических целей точность.

6. Рассмотренные примеры расчета и анализа динамики ОФП в МЦ с использованием полевой модели пожара позволили выявить закономерности развития пожара, которые существенно влияют на обеспечение безопасной эвакуации людей. Например, для помещений большой площади и маленькой высоты (например, встроенных автостоянок, торговых залов и т.д.) припотолочный слой не является плоскопараллельным перекрытием, равномерно прогретым и задымленным.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих ведущих периодических изданиях из перечня ВАК:

1. Колодяжный, С. А. Особенности пожарной опасности многофункциональных центров с атриумами (часть 2) [Электронный ресурс] / С. В. Пузач, С. А. Колодяжный // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – Вып. 1 (65). – 10 с. – Режим доступа: <http://ipb.mos.ru/ttb/2016-1>.

2. Колодяжный, С. А. К определению формы конвективной колонки над очагом пожара в помещении [Электронный ресурс] / С. В. Пузач, С. А. Колодяжный, Н. В. Колосова // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – Вып. 6 (64). – 8 с. – Режим доступа: <http://ipb.mos.ru/ttb/2015-6>.

3. Колодяжный, С. А. Особенности пожарной опасности многофункциональных центров с атриумами (часть 1) [Электронный ресурс] / С. В. Пузач, С. А. Колодяжный // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – Вып. 6 (64). – 10 с. – Режим доступа: <http://ipb.mos.ru/ttb/2015-6>.

4. Колодяжный, С. А. Модифицированная зонная модель расчета термогазодинамики пожара в помещении, учитывающая форму конвективной

колонки / С. В. Пузач, С. А. Колодяжный, Н. В. Колосова // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – № 12. – С. 33-39.

5. Колодяжный, С. А. Оптимизация работы приточно-вытяжной установки с высокоэффективным пластинчатым рекуператором в циклическом режиме / С. А. Колодяжный, А. А. Кавыгин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2015. – № 40 (59). – С. 18-28.

6. Колодяжный, С. А. Методика расчета противодымной приточной вентиляции / С. А. Колодяжный, Н. В. Колосова // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2015. – № 3 (60). – С. 46-51.

7. Колодяжный, С. А. Анализ проблем моделирования динамики пожара / И. В. Ситников, С. А. Колодяжный // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2015. – № 1 (14). – С. 29-35.

8. Колодяжный, С. А. Расчет современных пластинчатых рекуператоров с использованием функции коэффициента полезного действия / С. А. Колодяжный, А. А. Кавыгин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014. – № 36 (55). – С. 182-188.

9. Колодяжный, С. А. Математическое моделирование динамики основных опасных факторов в начальной стадии пожара / С. А. Колодяжный, И. И. Переславцева // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 4. – С. 403-412.

10. Колодяжный, С. А. Определение критического времени эвакуации при пожаре по потере видимости / С. А. Колодяжный, И. И. Переславцева // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4 (36). – С.168-176.

11. Колодяжный, С. А. Современное состояние и проблемы пожарной безопасности объектов строительства / И. И. Переславцева, С. А. Колодяжный // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – № 5 (56). – С. 115-122.

12. Колодяжный, С. А. Математическая модель для определения критического времени эвакуации при пожаре / С. А. Колодяжный, В. А. Козлов, И. И. Переславцева // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 3 (35). – С.128-138.

13. Колодяжный, С. А. Экспериментальное исследование и моделирование динамики удельной массовой скорости выгорания жидкости в условиях функционирования противодымной вентиляции / И. В. Ситников, С. А. Колодяжный, А. А. Однолько // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 3 (35). – С.149-157.

14. Колодяжный, С. А. Обеспечение безопасности функционирования систем газоснабжения при мониторинге технического состояния в условиях

информационной неопределенности / С. А. Колодяжный, Е. А. Сушко, С. А. Сазонова, К. А. Скляр // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 2 (34). – С.132-140.

15. Колодяжный, С. А. Экспериментальные исследования пластинчатого перекрестно-противоточного теплоутилизатора в условиях обмерзания / С. А. Колодяжный, А. А. Кавыгин, В. Г. Камбург // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 1 (33). – С.20-27.

16. Колодяжный, С. А. Автоматизированный расчет процесса охлаждения воздуха в жидкостном теплообменнике / С. А. Колодяжный, К. Н. Сотникова, А. А. Кавыгин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9, № 2. – С.98-102.

17. Колодяжный, С. А. Решение задачи статического оценивания систем газоснабжения / С. А. Колодяжный, Е. А. Сушко, С. А. Сазонова, А. А. Седаев // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 4 (32). – С.25-33.

18. Колодяжный, С. А. Оценка эффективности системы дымоудаления при горении движущегося состава в тоннеле / С. А. Колодяжный, С. И. Трусов, С. П. Аксенов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2012. – № 1. – С.205-210.

19. Колодяжный, С. А. Распределение вентиляционных воздушных потоков в помещении от источника теплоты / К. А. Скляр, С. А. Колодяжный, С. О. Потапова // Вестник МГСУ. – 2011. – № 7. – С. 554-558.

20. Колодяжный, С. А. Пожарная безопасность метрополитена / С. И. Трусов, С. А. Колодяжный, В. Я. Манохин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2011. – № 4. – С.203-207.

21. Колодяжный, С. А. Основные результаты научной деятельности кафедры теплогазоснабжения и кафедры пожарной и промышленной безопасности ВГАСУ / В. Н. Мелькумов, С. А. Колодяжный // Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – № 9. – С. 11-12.

22. Колодяжный, С. А. Пожарная безопасность при проектировании насосных и компрессорных станций / Н. А. Старцева, С. А. Колодяжный // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2008. – № 2. – С.155-161.

23. Колодяжный, С. А. Экологическое воздействие пожаров на окружающую среду / В. Н. Мелькумов, С. А. Колодяжный, Ю. З. Иншаков // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2008. – № 4. – С.198-208.

24. Колодяжный, С. А. Динамика воздухообмена в электропомещениях химических производств / Н. А. Старцева, С. А. Колодяжный // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного

университета. Строительство и архитектура. – 2008. – № 3. – С.86-95.

25. Колодяжный, С. А. Разработка математической модели управления параметрами воздушной среды в помещении при аварийном выбросе взрывоопасных веществ / А. И. Скрыпник, Н. А. Старцева, С. А. Колодяжный // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2003. – № 3. – С. 76-79.

Остальные основные публикации по теме диссертации:

26. Колодяжный, С. А. Влияние особенностей отдельных участков эвакуационного пути на общее время эвакуации людей из зданий и сооружений / С. А. Колодяжный, И. И. Переславцева // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. – 2014. – № 4 (17). – С. 13-17.

27. Колодяжный, С. А. Исследование влияния наличия поворотов на пути движения людского потока на общее время эвакуации из здания / С. А. Колодяжный, И. И. Переславцева // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2014. – № 3 (12). – С. 51-55.

28. Колодяжный, С. А. Выбор оптимальной схемы удаления загрязненного воздуха в условиях взрывопожарной ситуации / Н. А. Старцева, С. А. Колодяжный, К. Н. Сотникова // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2013. – № 6. – С.124-126.

29. Колодяжный, С. А. Анализ математических моделей пожара, применяемых для расчета времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара / И. В. Ситников, И. А. Шепелев, С. А. Колодяжный, А. А. Однолько // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. – 2012. – №1. – С. 81-87.

30. Колодяжный, С. А. Моделирование динамики опасных факторов пожара с учетом действий добровольных пожарных формирований / С. А. Колодяжный, А. А. Однолько, И. В. Ситников // В сб. «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы». Материалы III всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Воронеж, 2012. – С. 219-221.

31. Колодяжный, С. А. Метод расчета рациональных режимов работы местной и общеобменной вентиляции / К. А. Скляр, С. А. Колодяжный, Д. А. Драпалюк // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2012. – № 5. – С.116-118.

32. Колодяжный, С. А. Математическая модель переноса пожаровзрывоопасных веществ в сложных вентиляционных условиях / С. А. Колодяжный, Н. А. Старцева, С. И. Трусков // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2012. – № 5. – С.130-133.

33. Колодяжный, С. А. Разработка моделирующего алгоритма для описания термогазодинамических процессов развития пожара в производственном помещении / С. А. Колодяжный, А. А. Однолько, И. В.

Ситников // Материалы международной научно-практической конференции «Методические основы повышения качества образовательной и инновационной деятельности по направлениям подготовки 280700 «Техносферная безопасность» и 280705 «Пожарная безопасность». – М.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2012. – С. 196-199.

34. Колодяжный, С. А. Моделирование полей концентрации пожаровзрывоопасных веществ в сложных вентиляционных условиях / С. А. Колодяжный, С. И. Трусов, В. Н. Дурукин, Е. Н. Голованова // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. – 2011. – № 2. – С. 26-29.

35. Колодяжный, С. А. Промышленная безопасность местной и общеобменной вентиляции производственных помещений / С. А. Колодяжный, К. А. Скляр, Д. А. Драпалюк // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы». – 2011. – С. 188-191.

36. Колодяжный, С. А. Моделирование схем удаления загрязненного вредностями воздуха в условиях пожаровзрывоопасной ситуации / С. А. Колодяжный, Н. А. Старцева, К. Н. Сотникова // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы». – 2011. – С. 194-197.

37. Колодяжный, С. А. Совершенствование образовательного процесса: анализ программного обеспечения по расчету пожарного риска / С. А. Колодяжный, А. А. Однолько, И. В. Ситников // Материалы региональной научно-методической конференции «Непрерывное многоуровневое профессиональное образование: традиции и инновации». Часть 2. Информатизация образования. – 2011. – С. 46-52.

38. Колодяжный, С. А. Зависимость распределения взрывоопасных вредных веществ в помещениях от кратности воздухообмена / С. А. Колодяжный, И. И. Переславцева, О. Н. Филатова // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. – 2010. – № 2. – С. 192-196.

39. Колодяжный, С. А. Анализ методов расчета пожарного риска и соответствующего программного обеспечения в рамках совершенствования образовательного процесса / С. А. Колодяжный, А. А. Однолько, И. В. Ситников // Материалы региональной научно-методической конференции «Непрерывное многоуровневое профессиональное образование: традиции и инновации». Часть 2. Информатизация образования. Повышение качества профессиональной подготовки. – 2010. – С. 25-31.

40. Колодяжный, С. А. Влияние кратности воздухообмена на распространение вредных веществ / С. А. Колодяжный, И. И. Полосин, Н. А. Старцева // Каучук и резина. – 2008. – № 2. – С. 36.

41. Колодяжный, С. А. Анализ риска опасного производственного объекта: алгоритм построения последовательности событий, исходящих из основного события (аварийной ситуации) / С. А. Колодяжный, В. Н. Мелькумов, Н. Н. Гордиенко // Международный конгресс «Наука и инновации в строительстве. SIB – 2008». Том 3. Оценка риска и безопасность в

строительстве. – Воронеж, 10 – 15 ноября 2008 г. – С. 228-231.

42. Колодяжный, С. А. Оценка пожароопасности производственных помещений с оборудованиём, работающим под давлением / С. А. Колодяжный, Н. А. Старцева, Е. А. Сушко // Технические и социально-гуманитарные аспекты профессиональной деятельности ГПС МЧС России: проблемы и перспективы. Материалы II научно-практической конференции. – Воронеж: ВПТУ, 2007. – С.117-121.

43. Колодяжный, С. А. Структура анализа риска опасного производственного объекта / С. А. Колодяжный, Н. Н. Гордиенко // Оценка риска и безопасность строительных конструкций. Первая международная научно-практическая конференция. Том II. – Воронеж: ВГАСУ, 2006. – С. 35-38.

44. Колодяжный, С.А. Зависимость относительной концентрации газообразных тяжелых вредных веществ в замкнутом объеме от способа организации воздухообмена / И. И. Полосин, С. А. Колодяжный, Н. А. Старцева // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Инженерные системы зданий и сооружений. – 2003. – № 1. – С.73-76.

45. Колодяжный, С. А. Динамика проникновения концентраций взрывоопасных вредных веществ в электропомещения / Н. А. Старцева, С. А. Колодяжный // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Инженерные системы зданий и сооружений. – 2003. – № 1. – С.79-81.

Подписано в печать 20.06.2017 Формат 60×84¹/₁₆.

Печать офсетная. Тираж 100 экз. Заказ № 188.

Академия ГПС МЧС России. 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4