

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



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)

ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Научный консультант:

Заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор

Пузач Сергей Викторович

Воронеж 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ	18
1.1. Последствия пожаров в многофункциональных центрах	18
1.2. Особенности противопожарной защиты многофункциональных центров	25
1.3. Анализ современного состояния математического моделирования термогазодинамики пожара	30
1.4. Моделирование работы системы дымоудаления	45
1.5. Выводы по первой главе	47
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА В МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЦЕНТРАХ	49
2.1. Интегральная математическая модель	49
2.2. Зонная модель	52
2.2.1. Основные допущения	52
2.2.2. Основные уравнения модели	55
2.2.3. Условия однозначности задачи	61
2.3. Полевая математическая модель	63
2.3.1. Основные допущения	63
2.3.2. Основные уравнения модели	64
2.3.3. Замыкающие соотношения	67
2.3.4. Условия однозначности задачи	74
2.3.5. Метод решения системы уравнений	76
2.4. Расчет расхода системы противодымной вентиляции	78
2.5. Методика прогнозирования времени блокирования путей эвакуации	80
2.6. Выводы по второй главе	85
ГЛАВА 3. МОДИФИКАЦИЯ ЗОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ,	

УЧИТЫВАЮЩАЯ ФОРМУ КОНВЕКТИВНОЙ КОЛОНКИ	87
3.1. Постановка задачи	87
3.2. Трехзонная модель расчета тепломассообмена при пожаре	88
3.3. Экспериментальные исследования процесса распространения дымовой завесы в макете помещения	95
3.4. Анализ экспериментальных результатов	104
3.5. Выводы по третьей главе	109
ГЛАВА 4. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ ПО ИНТЕГРАЛЬНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	110
4.1. Опасные факторы пожара	110
4.2. Упрощение дифференциальных уравнений интегральной математической модели в начальной стадии пожара	111
4.3. Определение времени достижения предельных значений по температуре, концентраций кислорода и токсичных газов.....	124
4.4. Определение критического времени эвакуации по потере видимости..	127
4.5. Условия применимости формул по определению времени достижения предельных значений ОФП	135
4.6. Выводы по четвертой главе	137
ГЛАВА 5. УЧЕТ РАБОТЫ ВЫТЯЖНОЙ ПРОТИВОДЫМНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЖАРА	139
5.1. Разрешающая система дифференциальных уравнений	139
5.2. Анализ формул для расчета скорости выгорания жидкости и результатов соответствующих экспериментальных исследований	144
5.3. Численное моделирование пожара с учетом работы системы противодымной вытяжной вентиляции	154
5.4. Определение основных параметров противодымной вентиляции в помещении с очагом возгорания	162

5.5. Определение основных параметров противодымной вентиляции в помещениях, смежных с содержащим очаг возгорания.....	166
5.6. Выводы по пятой главе.....	170
ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ УДЕЛЬНОЙ МАССОВОЙ СКОРОСТИ ВЫГОРАНИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЖИДКОСТИ	172
6.1. Задачи экспериментального исследования и исходные параметры.....	172
6.2. Описание проведенных экспериментов.....	180
6.3. Анализ экспериментальных результатов	186
6.4. Проверка адекватности полученных регрессионных уравнений и переход к натурному объекту.....	197
6.5. Аналитические зависимости, описывающие динамику развития ОФП с учетом предложенных регрессионных уравнений.....	201
6.6. Сравнение численных и аналитических результатов по определению критических значений ОФП	207
6.7. Программный комплекс, реализующий представленные математические модели	210
6.8. Выводы по шестой главе	214
ГЛАВА 7. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ	216
7.1. Расчет пожарных рисков для реконструкции Государственного Кремлевского Дворца с учетом работы СДУ	216
7.2. Особенности термогазодинамики пожара в многофункциональном торговом комплексе ООО «МЕТРО Кэш энд Керри».....	223
7.3. Особенности термогазодинамики пожара в атриуме 5-этажного здания торгово-развлекательного комплекса «Галерея»	228
7.4. Особенности термогазодинамики пожара в подземной автостоянке торгово-развлекательного комплекса «Вегас II»	233
7.5. Выводы по седьмой главе	239

ВЫВОДЫ	240
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	243
ПРИЛОЖЕНИЕ I. Свидетельство о поверке лабораторных весов	258
ПРИЛОЖЕНИЕ II. Свидетельство о поверке анализатора дымовых газов	259
ПРИЛОЖЕНИЕ III. Акты внедрения результатов диссертационной работы ..	260

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. 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. Например, в торговом центре «Адмирал» г. Казани 11.03.2015 г. произошел пожар, в результате которого погибло 17 человек, пострадало более 70, без вести пропавшими числятся 2 человека.

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 эксперимен-

тальных 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., Loughed 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 её 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.

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, получено аналитическое уравнение регрессии, определяющее зависимость изменения удельной массовой скорости выгорания твердых материалов и жидкости с учетом времени включения СДУ и ее объемного расхода.

Достоверность результатов. При получении новых функциональных зависимостей применялись уточненные интегральные и зонные модели пожаров, широко используемых 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 достоверного регрессионного уравнения, а также сокращения количества опытов при определении последовательности проведения экспериментальных исследований. С помощью выбранного плана выполнена первичная статистическая обработка результатов проведенных серий эксперимента. Результаты экспериментальных данных и теоретических расчетов имеют удовлетворительную сходимость.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанный для МЦ комплекс математических моделей расчета динамики ОФП с разработанной 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 систем 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.

Результаты диссертации использованы:

– Главным управлением МЧС России по Воронежской области (г. Воронеж, ул. Куцыгина, д. 28) для выполнения комплекса мероприятий, направленных на снижение временных показателей оперативного реагирования на пожарах;

– ООО “Научно-технический центр «Пожарные инновации»” (Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Жуковского, д. 3) 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 (г. Воронеж, ул. Краснознаменная, д. 231) в учебно-методическом обеспечении учебной

дисциплины «Прогнозирование опасных факторов пожара»;

– ООО «Бастион», ООО «МИНЭПС» (г. Воронеж, ул. Октябрьской революции, д. 64) при разработке противопожарных мероприятий;

– ООО «Сервис-Безопасность» (г. Воронеж, Ленинский проспект, д. 2, корп. 3) при оценке величины пожарного риска;

– ООО «ПГС проект» (г. Воронеж, ул. Текстильщиков, д. 5Б) при определении времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в помещениях зданий с массовым пребыванием людей.

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.

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); на международной научно-практической конференции «Технические и социально-гуманитарные аспекты профессиональной деятельности ГПС МЧС России: проблемы и перспективы» (Воронеж: ВПТУ, 2006); на первой международной научно-практической конференции «Оценка риска и безопасность строительных конструкций» (Воронеж: ВГАСУ, 2006); на II научно-практической конференции «Технические и социально-гуманитарные аспекты профессиональной деятельности ГПС МЧС России: проблемы и перспективы» (Воронеж: ВПТУ, 2007); на международном конгрессе «Наука и инновации в строительстве. SIB – 2008. Том 3. Оценка риска и безопасность в строительстве» (Воронеж, 10 – 15 ноября 2008 г.); на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы инновационных систем информатизации и безопасности» (Воронеж: Научная книга, 2009); на региональной научно-методической конференции «Непрерывное многоуровневое профессиональное образование: традиции и инновации». (Воронеж, 2010); на II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (Воронеж, 2011); на 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); на III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (Воронеж, 2012); на международной научно-практической конференции «Методические основы повышения качества образовательной и инновационной деятельности по направлениям

подготовки 280700 «Техносферная безопасность» и 280705 «Пожарная безопасность» (Москва, 2013); на международной научно-практической конференции «Комплексные проблемы техносферной безопасности» (Воронеж: ВГТУ, 2014); на 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). Результаты исследования используются в научном, учебном и методическом процессах Воронежского ГАСУ.

Публикации. Результаты исследования опубликованы в 60 научных статьях, общим объемом 370 страниц, из них личный вклад автора составляет 277 с. В том числе 25 статей опубликованы в 10 изданиях, рекомендованных ВАК: «Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура» (11 статей), интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности» (3 статьи), «Известия Юго-Западного государственного университета» (3 статьи), «Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура» (2 статьи), «Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета» (1 статья), «Вестник Воронежского государственного технического университета» (1 статья), «Вестник МГСУ» (1 статья), «Пожаровзрывобезопасность» (1 статья), «Известия высших учебных заведений. Строительство» (1 статья), «Промышленное и гражданское строительство» (1 статья), общим объемом 204 страниц, личный вклад автора составляет 155 страниц.

В статьях, опубликованных в изданиях ВАК, изложены следующие основные результаты диссертации.

В работах [79, 80] дан анализ современного состояния математического моделирования термогазодинамики пожара и работы СДУ. Из анализа последствий пожаров в МЦ с научной и практической стороны обоснована

актуальность проблемы по разработке эффективных организационно-технических мероприятий по обеспечению безопасной эвакуации людей из МЦ на основе расчета термогазодинамики пожара, позволяющего найти время блокирования путей эвакуации ОФП в условиях работы СДУ (глава 1).

В работах [81, 82, 103] разработана модифицированная зонная модель расчета термогазодинамики пожара в помещении, учитывающая форму (угол полураскрытия) конвективной колонки. Создана экспериментальная установка для изучения динамики ОФП в мелкомасштабном помещении. Представлены результаты экспериментов по исследованию формы и угла раскрытия конвективной колонки. Показано, что использование в зонных моделях приближения свободно-конвективной струи, распространяющейся в неограниченном пространстве, без учета влияния ограждающих конструкций помещения противоречит реальной физической картине пожара в помещении (главы 2, 3).

В работах [29, 32, 33, 65] на начальном этапе пожара получены аналитические формулы для определения времени достижения предельных значений по температуре, концентрации кислорода и токсичных газов в помещении с очагом возгорания, а также критического времени эвакуации по потере видимости в смежных с очагом возгорания помещениях. С помощью полученных аналитических формул для определения критических интервалов времени эвакуации по потере видимости 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 (глава 4).

В работах [26, 27, 28, 38, 104, 109, 113] рассмотрены вопросы эффективности СДУ и их конструктивных элементов, выполнен анализ действующего гибкого объектно-ориентированного противопожарного нормирования и методы расчета основных параметров СДУ [30] в МЦ (глава 5).

В работах [35, 100, 101, 102, 109] сформулирована интегральная математическая модель начальной стадии пожара, учитывающая

функционирование СДУ и неустановившийся процесс горения жидкости. Выполнено планирование и постановка экспериментального исследования динамики удельной массовой скорости неустановившегося процесса горения жидкости в условиях функционирования СДУ, в том числе времени её включения и объемного расхода, разработано регрессионное уравнение (глава 6).

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

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ

1.1. Последствия пожаров в многофункциональных центрах

В последние годы в мире и в России произошло много крупных пожаров в МЦ, приведших к массовой гибели людей и большому материальному ущербу, что существенно снижает уровень общественной безопасности.

Из-за несоблюдения необходимых норм безопасности пожары часто случаются в торговых центрах мегаполисов Филиппин и других стран Юго-Восточной Азии. Почти двое суток понадобилось филиппинским пожарным, чтобы потушить 07.09.2012 г. пожар в торговом центре Tutuban Mall в г. Бали (Индонезия), в результате происшествия пострадали 45 человек [83]. Возгорание произошло днем на первом этаже в центральной части здания. В ходе борьбы с пламенем были госпитализированы почти 50 человек: 28 профессиональных пожарных, 14 добровольцев и трое гражданских лиц.

Это уже не первый подобный случай, в 2012 г. в Большой Маниле более чем сотне филиппинских пожарных потребовалось почти четверо суток, чтобы при поддержке пяти десятков пожарных машин потушить возгорание в одном из старейших в столице Филиппин торговых центров Ever Gotesco Grand Central Mall, в результате которого пострадали 17 человек.

Жертвами пожара, произошедшего 28.05.2012 г. в одном из крупных торговых центров Villagio Mall, расположенном в западной части Дохи - столице Катара, стали 19 человек, в том числе 13 детей (семь девочек и шесть мальчиков), четверо учителей и два сотрудника службы гражданской обороны) [84].

Крупный пожар произошел утром 27.02.2013 г. в многоэтажном здании торгового центра в столице индийского штата Западная Бенгалия Калькутты (Колкаты) [85]. К шестиэтажному зданию прибыли 25 пожарных расчетов, которые примерно за два часа смогли локализовать пожар. Предположительно,

причиной пожара стало короткое замыкание. Как минимум 19 человек погибли, серьезные ожоги получили около 50 человек, шестеро госпитализированных находились в критическом состоянии.

Жертвами пожара в компьютерном шестиэтажном торговом центре «Наньтун» в столице северо-восточной китайской провинции Хэйлуцзян городе Харбин 26.08.2011 г. стали три человека [86]. Пожар начался около 14.00 по местному времени и стал быстро распространяться по последнему этажу здания, где расположены магазины, торгующие компьютерной и электронной техникой. Пожар был потушен к 15.00. Сотням покупателей и продавцов удалось выбраться из горящего здания. Жертвами пожара стали строители, работавшие на шестом этаже. По словам пожарных, шестой этаж здания был построен недавно без разрешения властей.

16.01.2011 г. сильный пожар в торгово-развлекательном комплексе "Европа" в г. Уфе унес жизни 35-летнего рабочего и 17-летней школьницы [87]. В огне пострадали 15 человек, восемь из них госпитализированы. Было возбуждено уголовное дело в связи с нарушением требований пожарной безопасности. По официальной версии следствия, причиной пожара мог стать разрыв газового баллона во время ремонта на втором этаже здания. После пожара комплекс полностью вышел из эксплуатации. В ходе следствия были опрошены сотни свидетелей, проведены объемные и долгосрочные пожарно-технические и строительно-технические экспертизы, которые доказали, что в ходе эксплуатации здания были серьезно нарушены правила пожарной безопасности.

28.10.2009 г. пожар произошел в торговом центре "Мегастрой" в Комсомольском районе г. Тольятти (Самарская область) [88]. Загорелась мебель в торговом зале на первом этаже. Площадь возгорания составила 300 квадратных метров. С места пожара эвакуированы 15 человек. В результате один человек погиб, трое были госпитализированы.

13.03.2009 г. пожар произошел в крупнейшем торговом комплексе в столице Бангладеш Дакке [89]. Пожар начался на 17-м этаже 21-этажного

комплекса "Басундхара-Сити", который расположен в самом центре столицы. На пострадавших от огня этажах расположены преимущественно офисы. В результате ЧП семь человек погибли, 30 — пострадали. По данным полиции, все погибшие — сотрудники комплекса.

В ночь на 05.01.2009 г. в г. Бангкоке (Таиланд) пожар произошел в здании, в котором находится торговый центр и жилые помещения [90]. Возгорание началось в магазине сотовой связи. После этого огонь быстро перекинулся и на другие помещения. Пожар стал причиной гибели одного человека, 38 человек, по данным полиции, пострадали. Местные СМИ сообщали о 47 пострадавших.

17.10.2008 г. пожар произошел в торговом центре города Алеппо - второго по значению города Сирии на севере страны [91]. Огонь полностью охватил первые два этажа, которые были отданы в аренду частным магазинам по продаже мобильных телефонов, электротоваров, одежды и продуктов. Также здесь проходила выставка китайских товаров. В результате пожара восемь человек погибли, еще десять пострадали.

23.09.2005 г. пожар случился в крупнейшем торговом центре столицы штата Чиуауа на севере Мексики [92]. Огонь вспыхнул в залах второго этажа и начал быстро распространяться по всему зданию, охватив лестничные марши и складские помещения. В этот час в торговом центре, по оценкам властей, находилось свыше пяти тысяч человек покупателей и персонала. Всем им угрожала гибель, так как на первом этаже центра находится отдел, торгующий бытовыми баллонами с бутаном. Двое пожарных сумели пробиться в опасную зону и отстоять ее от огня, но сами при этом погибли от ожогов и отравления ядовитыми веществами. Еще трое пожарных были госпитализированы. Из посетителей торгового центра никто серьезно не пострадал. Борьба с огнем продолжалась более десяти часов.

11.06.2005 г. пожар произошел в ухтинском торговом центре «Пассаж» [93]. Двадцать пять человек погибли, еще десять получили травмы. Причиной пожара стал поджог.

26.02.2005 г. пожар вспыхнул в крупном торговом центре в городе Тайчжуне на Тайване [94]. Языки пламени появились на уровне 18-го этажа супермаркета Цзиньша (Золотой песок). Через час огонь охватил верхние этажи 25-этажного здания. В огненной ловушке на верхних этажах здания оказалось не менее 20 человек. Большая часть из них была эвакуирована с помощью вертолетов. В результате пожара погибли два человека - охранник здания и один из пожарных.

Пожар в торговом центре «Адмирал» произошёл 11.03.2015 года в г. Казани [95]. Возгоранию был присвоен четвертый номер сложности по пятибалльной шкале. В результате пожара погибло 17 человек, пострадало более 70, без вести пропавшими числятся 2 человека. Из здания было эвакуировано более 650 человек. Некоторые предприниматели, невзирая на эвакуацию, пытались спасти свой товар. К ликвидации последствий происшествия было привлечено 305 человек и 76 единиц техники (в том числе от МЧС России - 194 человека и 42 единицы техники). Для тушения пожара были также привлечены пожарный поезд и три вертолёт Ми-8. Конструкция здания частично обрушилась. 12 марта было принято решение принудительно обрушать здание, поскольку оно представляло угрозу для спасателей. До 7 часов утра того же дня велась проливка завалов. 14 марта фасад «Адмирала» был полностью демонтирован. До 17 марта спасатели вели поисковые работы на территории торгового центра, из-под завалов извлекались тела погибших. К ликвидации последствий пожара были привлечены свыше 1000 человек и более 170 единиц техники, из них от МЧС России — свыше 580 человек и более 70 единиц техники. Общий объем завалов составил более 8 тысяч кубометров. По версии следствия, в день трагедии трое рабочих по поручению администрации рынка проводили работы по гидроизоляции крыши «Адмирала» с использованием газового баллона и горелки. Следствие полагает, что в результате их действий и произошел пожар. Здание торгового центра «Адмирал» прошло реконструкцию из здания завода, состоящего из помещений

складов и цехов, и было сдано в эксплуатацию без официального разрешения. Фактически это здание было из металлоконструкций.

Большое количество пожаров в многофункциональных центрах в России с большим материальным ущербом и гибелью или травмами людей произошло в последние 3 года, например [96]:

- в 2015 году:

05.02 в торгово-развлекательном центре "РИО" на севере Москвы (пострадало три человека, двоим помощь была оказана на месте, одного госпитализировали, площадь возгорания составила 200 м²);

- в 2014 году:

29.12 в г. Твери на первом этаже торгового центра "Радость" (пострадало три человека, двоим помощь была оказана на месте, одного госпитализировали, площадь пожара равна 400 м²);

25.12 в г. Оренбурге произошло возгорание складских помещений крупнейшего в городе торгового комплекса - молла «Армада» на Шарлыкском шоссе (было обнаружено тело 58-летней женщины с ожогами, еще один пострадавший, 61-летний мужчина, скончался по дороге в больницу, пострадали еще пять человек, двое из которых после оказания медицинской помощи были отпущены домой, а трое доставлены в городскую больницу, площадь пожара составила примерно 400 м²);

29.10 в г. Сарове Нижегородской области произошел пожар в ТЦ "Атриум" (огонь повредил более 3000 м² здания, никто не пострадал);

16.08 произошел сильный пожар в торговом центре "Аэропорт" в Санкт-Петербурге (площадь возгорания составила 200 м², на месте происшествия работали 112 сотрудников МЧС, были задействованы 30 машин, для ликвидации огня спасателям пришлось вскрыть 100 м² крыши здания, пострадавших не было);

11.08 крупный пожар произошел в торговом центре «Руслан» г. Реж Свердловской области (сгорел третий мансардный этаж здания, где располагался магазин одежды, также затопило во время тушения нижние этажи

торгового центра, где находились бутики и офисы, площадь пожара составила 1200 м²);

03.05 крупный пожар произошел в гипермаркете «Глобус» в г. Владимире (возгорание началось в складских помещениях, к приезду пожарных подразделений пожар развился до крупных размеров и окончательно потушить его удалось только к утру следующего дня. Пожаром, площадь которого составила порядка 500 м², уничтожены складские помещения комплекса. Удалось избежать распространения огня в торговый зал, покупатели и сотрудники гипермаркета были оперативно эвакуированы. Одному человеку оказана медицинская помощь);

18.03 произошел пожар в магазине «Еврострой» на улице Лыняной в Костроме (Эпицентр возгорания находился в центре торгового здания, где располагались стеллажи с обоями и дверями. Пожарным удалось локализовать пожар на площади 350 м², погибших и пострадавших не было);

- в 2013 году:

08.08 произошло возгорание крыши двухэтажного торгово-развлекательного комплекса «Фабрика» в г. Кирове (Пожару был присвоен четвертый номер сложности по пятибалльной шкале. Его площадь составила 600 м². Из здания были эвакуированы 82 человека, погибших и пострадавших не было);

13.07 в г. Всеволожске Ленобласти по адресу: Всеволожский проспект, дом 61 загорелся торговый центр (Были эвакуированы 75 человек. Почти через шесть часов после возгорания, пожарным удалось погасить открытое пламя. С момента начала пожара его площадь увеличилась в 10 раз - до 300 м²);

07.07 в екатеринбургском торговом центре "Кит" загорелась кровля (причиной пожара стало неосторожное обращение с огнем рабочих при курении, было эвакуировано 500 человек, никто не пострадал

06.07 в Москве произошел пожар в двухэтажном торговом центре по адресу: Золоторожский вал, 38 (площадь пожара составила 700 м². Здание серьезно пострадало. Во время тушения произошло частичное обрушение. В

тушении огня были задействованы несколько десятков пожарных расчетов и два вертолета. Из-за сильного задымления в районе места происшествия для входа и выхода пассажиров была закрыта станция метро Площадь Ильича. В результате пожара никто не пострадал);

24.05 в г. Краснодаре произошел пожар в шестиэтажном ТЦ «Оскар» на улице Московская, 34 (площадь пожара составила 200 м², были эвакуированы свыше 300 человек, также удалось спасти девушку из застрявшего лифта);

10.04 в г. Владивостоке около 18.30 по местному времени начался пожар на складе промтоваров в ТЦ «Китай-Город» (огонь распространился на площадь 700 м² и угрожал перекинуться на соседний склад с пиротехникой, однако возгорание удалось локализовать);

02.04 в г. Черемхово Иркутской области 6.39 по местному времени загорелся торговый центр «Октябрь» (на момент прибытия первого подразделения пожарных огонь распространился на второй и третий этажи, пристроенный вплотную склад и кровлю, площадь пожара составила 1,2 тысячи м², погибших и пострадавших не было);

11.03 в г. Барнауле произошло возгорание утеплителя на 5-6 этаже торгового центра (площадь возгорания составила 500 м², были эвакуированы 50 человек, никто не пострадал);

08.02 под Иркутском произошел пожар в торговом центре «Лада» (через 11 минут распространение огня ограничили площадью 120 м², посетители были эвакуированы, пострадавших не было);

02.02 в г. Владивостоке произошел пожар на проспекте Столетия Владивостока (горели чердачные помещения прилегающего торгового центра «Искра», огонь был локализован на площади 300 м²);

09.01 в станице Северская Краснодарского края произошло крупное возгорание в торговом центре (площадь пожара составила 150 м², пожару был присвоен третий номер сложности);

01.01 в г. Владикавказе загорелась кровля площадью 800 м² в торговом центре «Поиск» (пострадавших и погибших нет).

Анализ крупных произошедших пожаров в многофункциональных центрах позволяет сделать следующие основные выводы:

- пожары привели к значительным человеческим жертвам и большому материальному ущербу (вплоть до полного разрушения здания);

- 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.

1.2. Особенности противопожарной защиты многофункциональных центров

МЦ являются зданиями с массовым пребыванием людей, в которых находятся помещения, соответствующие разным классам пожарной опасности: Ф2.1 (кинотеатры, концертные залы), Ф2.2 (выставки, музеи), Ф3.1 (здания организаций торговли), Ф3.2 (здания организаций общественного питания), Ф3.5 (помещения для посетителей организаций коммунального и бытового обслуживания), Ф3.6 (физкультурно-оздоровительные комплексы и спортивные тренировочные учреждения с помещениями без трибун для зрителей, бытовые помещения), Ф4.3 (органы управления учреждений, офисы), Ф5.1 (производственные помещения), Ф5.2 (складские помещения).

В многофункциональных центрах широко распространены атриумы. Атриумом называется часть здания в виде многосветного пространства, которое развито в вертикальном направлении с поэтажными балконами и галереями с выходящими на них помещениями разного назначения [98, 155].

Атриум может использоваться для различных целей, образует своего рода вестибюль и является коммуникационным пространством, которое обеспечивает доступ ко всем частям здания. Атриумное пространство может

рассматриваться как расширение основных площадей здания из-за хорошей обозреваемости внутреннего пространства здания.

Важнейшим конструктивным элементом атриума является светопроницающая оболочка, что приводит к ярко выраженному оранжерейному эффекту. Интерьер прогревается коротковолновой составляющей солнечного света, которая проходит через остекление. Тепловое излучение из здания наружу имеет большую длину волны и не пропускается стеклом. Следовательно, тепло удерживается внутри атриумного пространства. Из-за разницы атмосферного давления на разной высоте атриума возникает воздушная тяга. Вертикальное движение воздуха усиливается подъемом нагретых из-за парникового эффекта воздушных масс, что приводит к созданию мощного восходящего тока воздуха. При наличии проемов создается сильная тяга из помещений, сопряженных с атриумом. Эта тяга может быть эффективно использована для вентиляции.

Для обеспечения пожарной безопасности существенными особенностями объемно-планировочных и конструктивных решений атриумов являются:

- многосветное пространство, которое развито в вертикальном направлении и объединяет разные уровни атриумного пространства в общий объем;
- помещения различного назначения могут выходить на поэтажные галереи и балконы.

Характерный вид атриума МЦ приведен на рис. 1.1.

Проблемы противопожарной безопасности являются наиболее острыми среди остальных технических проблем, с которыми сталкиваются проектировщики МЦ [98, 140]. Общепринятые подходы решения вышеуказанных проблем являются недостаточными. Возникает необходимость разработки специальных проектных решений.

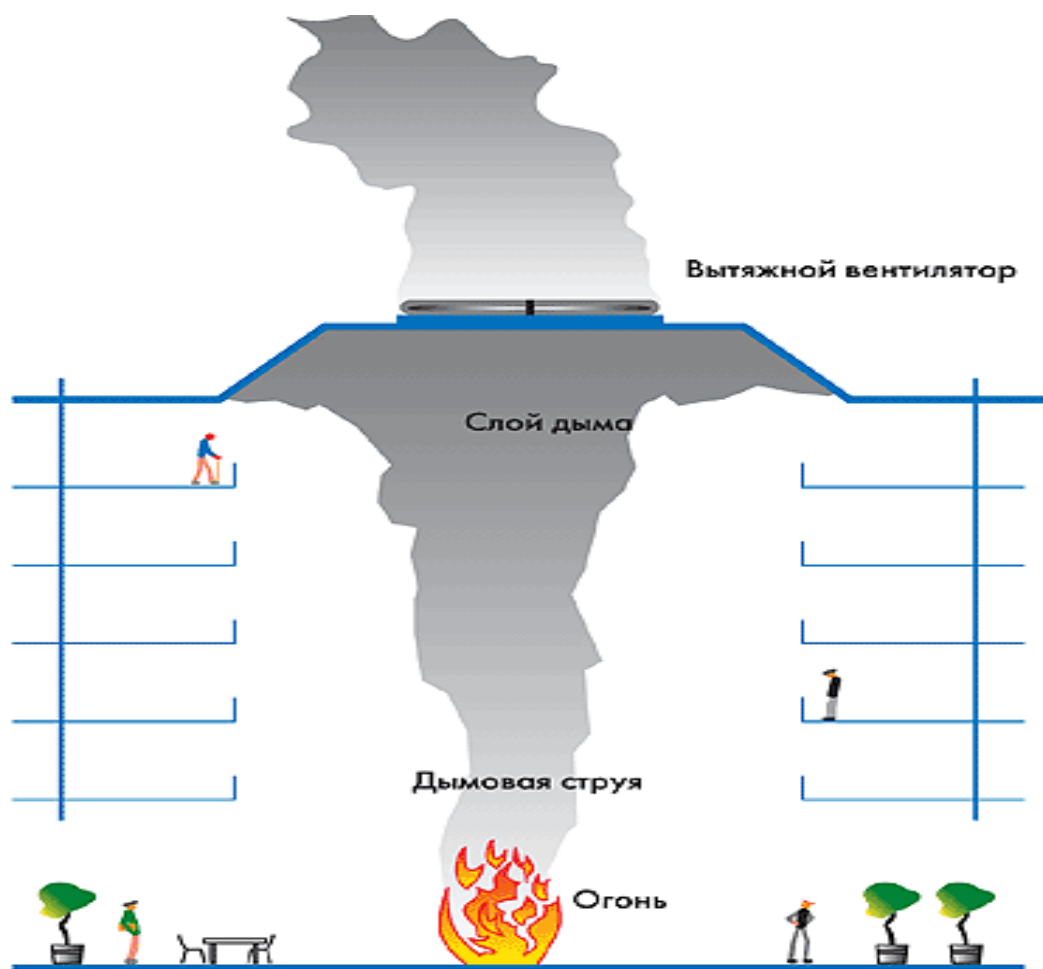


Рис. 1.1 – Характерный вид атриума МЦ

Если здания внутри не имеют герметично изолированных перекрытий, то продукты горения быстро распространяется в вертикальном направлении. Большую сопротивляемость распространению дыма и огня имеют обычные здания, этажи которых разделены междуэтажными перекрытиями, а изолированные эвакуационные выходы дают возможность быстро покинуть опасные места и уйти в безопасную зону.

Однако атриумные здания имеют ряд преимуществ в случае правильной организации средств противопожарной защиты. Например, большой объем воздуха в атриуме охлаждает продукты горения, уменьшает концентрацию частиц дыма и увеличивает необходимое время эвакуации людей. В противопожарных нормах США (1981 г.) эта особенность атриумов учтена [98].

Так как любой атриум проектируется индивидуально, то выбор средств и методов противопожарной защиты должен учитывать особенности объемно-планировочных и эксплуатационных характеристик атриума. Разработка планов безопасной эвакуации людей, использование средств защиты от дыма и огня позволяет решить проблемы противопожарной безопасности. Обеспечение безопасности людей неразрывно связано с общими планировочными решениями по коммуникации в здании, защита от дыма оказывает решающее влияние на проект вентиляции, средства защиты от огня и других опасных факторов пожара, требуют использования специального оборудования.

Для обеспечения пожарной безопасности в МЦ применяются:

- система предотвращения и тушения пожаров;
- системы противопожарной защиты;
- комплекс организационно-технических мероприятий.

В состав системы предотвращения пожара входят следующие мероприятия [99]:

- нормирование пределов огнестойкости строительных конструкций;
- ограничение использования пожарных веществ и материалов;
- нормирование площадей пожарных отсеков;
- взаимное расположение помещений в здании;
- обеспечение необходимого количества и размеров эвакуационных выходов;
- обеспечение безопасных противопожарных расстояний (разрывов) между соседними зданиями и сооружениями.

Системы противопожарной защиты, используемые в МЦ, следующие [99]:

- автоматическая установка сигнализации о пожаре;
- система, обеспечивающая оповещение о пожаре и управление при этом эвакуацией людей;
- система защиты против дыма;
- автоматические установки водяного пожаротушения;

- система защиты отопления, вентиляции и кондиционирования;
- внутренний противопожарный водопровод;
- наружное противопожарное водоснабжение.

Организационно-технические мероприятия состоят из [99]:

- планов пожаротушения здания во время строительства и эксплуатации;
- организации противопожарной охраны объекта и службы эксплуатации систем противопожарной защиты;
- планов эвакуации людей;
- обеспечения первичными средствами пожаротушения и индивидуальными средствами защиты;
- соблюдения противопожарного режима.

Используются «пассивные» и «активные» методы противопожарной защиты МЦ [99, 155].

К «активной» защите можно отнести:

- автоматические спринклерные установки водяного пожаротушения;
- систему дымоудаления с механическим побуждением;
- систему дымоудаления с естественным побуждением;
- использование дренчерных завес для отделения путей эвакуации от атриумного пространства;
- применение противопожарных штор для отделения путей эвакуации от атриума и т.п.

«Пассивная» защита включает в себя:

- ограничение постоянной пожарной нагрузки, состоящей из сгораемых конструкций;
- ограничение временной пожарной нагрузки, включающей в себя сгораемую мебель, одежду и т.п.;
- использование противопожарных перегородок для отделения путей эвакуации от атриума и т.п.

В качестве требований к противопожарной защите атриумов МЦ можно выделить следующие [99, 155]:

- применение негорючих строительных конструкций;
- использование спринклерных установок водяного пожаротушения по всему объему атриума;
- отделение противопожарными дверями вестибюлей от лифтовых холлов и лестниц, ведущих с других этажей;
- создание зон безопасности (помещений, отделенных от атриума противопожарными дверями и перегородками) перед эвакуационными выходами для обеспечения безопасной эвакуации людей;
- использование противопожарных штор с высотой не менее 0,5 м от потолка, установленных на каждом уровне атриумного пространства, для образования «резервуара» дыма под перекрытием атриума;
- применение системы противодымной защиты с механическим побуждением;
- ограничение массы сгораемых материалов и веществ в атриуме.

Таким образом, особенности объемно-планировочных и конструктивных решений МЦ требуют тщательного обоснования выбора параметров систем противопожарной защиты с использованием моделирования динамики ОФП для обеспечения безопасной эвакуации людей.

1.3. Анализ современного состояния математического моделирования термогазодинамики пожара

Практический смысл результаты любого математического моделирования имеют лишь в случае, когда модель с достаточной степенью точности отображает действительно протекающие явления. Поэтому при проведении моделирования важным вопросом является проверка адекватности создаваемой модели реальному объекту или процессу.

Математические модели можно подразделить на детерминированные и вероятностные. Первые из них описывают определенные объекты однозначно, с учетом начальных условий и закономерностей протекания изучаемого процесса его развитие и результат можно полностью предсказать. Вторые описывают случайные процессы, развитие которых подчиняется законам

распределения вероятностей соответствующих случайных величин, однозначно конечный результат здесь представлен быть не может.

Что касается имитационных моделей, то они представляют собой программный комплекс для ПЭВМ, который позволяет воспроизводить процессы, описывающие свойства и динамику объекта исследования. Результаты получаемых при этом многочисленных численных экспериментов обрабатываются с помощью методов математической статистики и позволяют изучить свойства изучаемого объекта. Имитационные модели обычно применяют при изучении сложных процессов и явлений, для описания которых невозможно построить достаточно простых и удобных для исследования аналитических моделей. В ряде случаев используют сочетание относительно простых аналитических и более сложных имитационных моделей.

Одним из важных параметров развития пожара в помещении, характеризующего пожарную опасность этого объекта, является тепловая мощность пожара, выделяемая в единицу времени. Оценка этого параметра требует не только учета физико-химических параметров и общего количества горючей нагрузки, но и характера ее размещения в помещении, учета архитектурно-строительных особенностей рассматриваемого объекта, возможных вариантов развития в нем пожара (моменты времени и степень разрушения остеклений оконных проемов, возможные разрушения ограждающих конструкций).

Все вышеперечисленное оказывает существенное влияние на характер теплообмена при пожаре в помещении, а, следовательно, на его последствия и условия ликвидации. Очевидно, что перечисленные выше параметры и факторы не могут быть заданы детерминированным набором числовых значений. В реальных условиях возможно большое количество сочетаний их различных вариантов и варьирование конкретных числовых значений. Сюда следует добавить вероятностные оценки эффективности и надежности систем пожаротушения и сигнализации, условий эвакуации людей из горящего здания. Следовательно, любой реальный пожар в теоретико-

вероятностном смысле можно рассматривать как сложный случайный процесс, для которого характерна многократная неопределенность.

Таким образом, смешанная (естественная и вынужденная) конвекция, вызванная горением горючего материала и работой систем противопожарной защиты (дымоудаление, пожаротушение) в помещении, характеризуется сложными термогазодинамическими условиями одновременного воздействия большого количества факторов, к которым относятся неизотермичность, турбулентность, излучение, сжимаемость, химические реакции, наличие трех фаз в газовой среде, поперечный и продольный градиенты давления, кривизна и шероховатость поверхности, вдув-отсос на стенке, переход ламинарного течения в турбулентное.

Главными особенностями термогазодинамики пожара в помещении являются:

- скорости течения газовой смеси пренебрежимо малы по сравнению со скоростью звука;
- максимальная разница давлений в различных зонах помещения составляет десятые доли процента от значения среднеобъемного давления в помещении, если отсутствуют взрывы с образующимися ударными волнами;
- тепловой режим пожара определяется величинами тепловых эффектов химических реакций;
- процесс турбулентной диффузии необходимо учитывать, так как скорости диффузии газов и частиц дыма достаточно велики.

При пожаре скорость, температура и другие параметры турбулентных потоков смеси газов испытывают беспорядочные колебания (пульсации). Система исходных уравнений, начальные и граничные условия к ней не определяют однозначно мгновенные распределения величин всех параметров в любой момент времени в помещении с заданными геометрическими размерами. Вышеуказанные распределения существенно зависят от малых случайных возмущений [21]. Следовательно, задача в полном виде может быть сформулирована следующим образом:

- распределения вероятностей полей величин всех параметров смеси газов в начальный момент времени заданы;
- необходимо определить вероятности реализации различных полей этих параметров в разные моменты времени.

Решение конкретных задач в такой формулировке в настоящее время даже с использованием современных ЭВМ не может быть реализовано. Поэтому используется менее полное описание турбулентных потоков газов с использованием понятия плотности вероятности разных величин параметров газа [49], такое как применение уравнений Навье-Стокса или для расчета средних по времени величин – уравнений Рейнольдса [116]. Уравнения Навье-Стокса, описывающие мгновенные значения параметров потока смеси газов в трехмерных, нестационарных теплофизических условиях пожара, решить численно прямым счетом в настоящее время не является возможным, даже используя современные супер ЭВМ.

Решение уравнений Рейнольдса, являющихся нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных и выражающих законы сохранения для осредненных величин смеси газов, возможно в настоящее время с использованием для замыкания системы уравнений подходящей модели турбулентности, что составляет сущность «моментных» методов. Существующие модели турбулентности, такие как $k-\varepsilon$, $k-\omega$, алгебраические, Смагоринского и т.д. [49, 50, 111, 157] показывают, что для расчета каждого конкретного случая течения необходимо использовать определенный набор констант моделирования. Любая модели турбулентности оговаривает круг течений и условий, в которых ее можно применять [49]. При теплообменной защите поверхностей строительных конструкций (защита оборудования от теплового воздействия пожара и т.п.) с учетом сложных граничных условий выбор модели является сложной задачей. Даже для широкого круга стационарных турбулентных безотрывных течений константы моделирования разных моделей турбулентности недостаточно обоснованы и систематизированы. Попытки усложнения моделей турбулентности не привели

к повышению точности расчета [49]. Например, при определении параметров турбулентного пограничного слоя погрешность существующих моделей турбулентности составляет порядка 20-30%, для ряда течений погрешность может составлять 100% и более [49]. Градиентные полуэмпирические теории не позволили создать универсальную модель турбулентности [49]. Пристенная турбулентность до сих пор остается одной из наиболее сложных проблем теории теплообмена. Следовательно, тщательный выбор модели турбулентности необходим при математическом моделировании конвективного турбулентного теплообмена при пожаре в помещении.

Детерминированные методы расчета динамики опасных факторов пожара в помещении делятся на четыре группы:

- аналитические;
- интегральные;
- зональные;
- дифференциальные (полевые).

Методы отличаются друг от друга разным уровнем детализации термогазодинамической картины пожара.

Одной из первых и простейших аналитических моделей расчета термогазодинамики пожара была зависимость средней температуры пожара от времени, задаваемой в виде таблицы или эмпирической формулы.

В виде таблицы эта зависимость была получена еще в 1916 году в ходе измерений температуры пожара при горении древесины, тогда же появилась концепция огнестойкости строительных конструкций [5]. В виде формулы в отечественной литературе [43] эта зависимость представлена равенством

$$T = T_0 + 345 \lg(8\tau + 1), \quad (1.1)$$

где τ – время, мин.; T , T_0 – средняя текущая и начальная температура пожара соответственно, К.

Международная организация по стандартизации в 1966 году рекомендовала эту зависимость как температурный режим для проведения испытаний на огнестойкость строительных конструкций [5].

Кроме формулы (1.1) использовались различные эмпирические формулы, полученные для конкретных условий пожара. Например, для помещений и моделей помещений размерами 0,5×0,34×0,22, 2,0×1,4×0,88, 14×6×5,2 и 66×18×5,2 м с ограждающими конструкциями из бетона и кирпича в условиях горения горючих жидкостей (бензина, дизельных топлив, метилового и этилового и метилового спирта) формула имеет вид [43]:

$$T_{\text{ср}} / T_{\text{ад}} = A \cdot \text{Bo}^k, \quad (1.2)$$

где $T_{\text{ср}}$ – среднеобъемная температура в помещении, К; $T_{\text{ад}}$ – адиабатная температура, К; Bo – критерий Больцмана; $A = 0,7 \text{Nu}^{-0,01}$; $\text{Nu} = \frac{\alpha_{\text{к}} L}{\lambda_{\text{ср}}}$ – число Нуссельта; $\alpha_{\text{к}}$ – эмпирический коэффициент теплообмена между смесью газов, находящейся в помещении, и строительными ограждающими конструкциями помещения, Вт/(м²·К); L – характерный размер помещения, м; $\lambda_{\text{ср}}$ – средний коэффициент теплопроводности дымовых газов, Вт/(м·К); $k=0,17$ при $\text{Bo} \leq 1$ и $k=0,125$ при $\text{Bo} > 1$.

Эмпирические формулы (например, (1.2)) из-за невыполнения точного соблюдения теории подобия для пожара, происходящего в помещении [41, 43], имеют область применения, ограниченную исходными данными экспериментов, в которых они получены.

До появления первой интегральной модели расчета динамики ОФП [43] аналитические модели позволяли определить величину только одного ОФП – среднеобъемной температуры. Переход к распределениям температур по объему помещения, что собственно и необходимо для решения задач пожарной безопасности, например обеспечения безопасной эвакуации людей, осуществлялся по эмпирическим зависимостям, например из работы [41] для формулы (2), также имеющим ограниченную область применения:

$$T(x, y) = T_{\text{ср}} [0,8 + 0,2(y / y_0)] \cdot [1,33 - x / (2x + x_0)], \quad (1.3)$$

где y_0 (м) – половина от высоты помещения; y (м) – координата по вертикали, отсчитываемая от уровня пола; x_0 (м) – половина расстояния между очагом

горения и местом выхода газов наружу из помещения; x (м) – горизонтальная координата, отсчитываемая от очага возгорания.

Аналитические решения для расчета не только температуры, но и величин других ОФП получены из решения системы дифференциальных уравнений интегральной модели (анализ которых выполнен ниже) при существенном упрощении термогазодинамической картины пожара:

- через открытые проемы помещения выходит наружу смесь продуктов горения и воздуха и нет притока наружного воздуха внутрь помещения;

- коэффициент теплопотерь принимается постоянным;

- удельные коэффициенты образования токсичных газов и удельный коэффициент дымообразования при сгорании 1 кг материала, а также удельная скорость газификации горючего материала постоянны и не зависят от концентрации кислорода;

- высота помещения меньше 6 м.

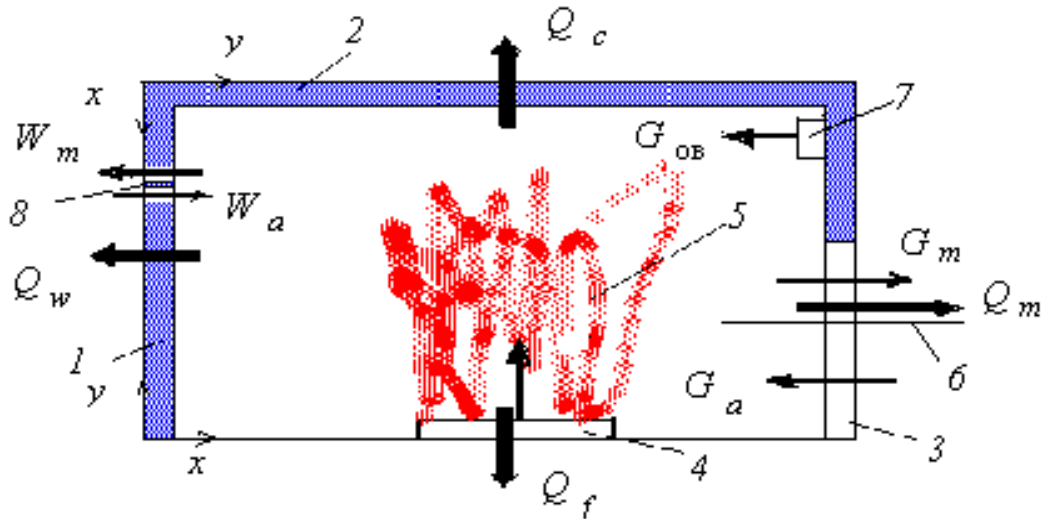
Условие отсутствия поступления воздуха из окружающей среды даже на начальной стадии развития пожара будет выполняться лишь при небольшом количестве открытых проемов. В работе [97] показано, что рассматриваемое условие можно применять, если критерий проемности помещения $\Pi \leq 5$, где значение Π вычисляется по формуле

$$\Pi = \frac{S_{\text{пр}} \sqrt{h_{\text{пр}} g}}{V} \tau_{\text{кр}}^{\text{офп}}. \quad (1.4)$$

где $S_{\text{пр}}$ – общая площадь открытых проемов, м²; $h_{\text{пр}}$ – высота проемов, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; V – объем помещения с очагом возгорания, м³; $\tau_{\text{кр}}^{\text{офп}}$ – время достижения критического значения одного из ОФП.

В интегральных моделях [41, 69], являющихся наиболее простыми с точки зрения математического описания, определяемыми параметрами являются среднеобъемные температуры, плотности, давление, массовые концентрации токсичных продуктов горения, кислорода, оптической плотности дыма и огнетушащего вещества.

Схема тепломассообмена в помещении представлена на рис. 1.2 [69].



- 1 – стены помещения; 2 – потолок помещения; 3 - открытый проем; 4 - горючее вещество;
 5 - очаг горения; 6 – плоскость равных давлений; 7 - система пожаротушения;
 8 – противодымная и приточная вентиляция

Рис. 1.2 – Схема тепломассообмена в помещении при использовании интегральной модели

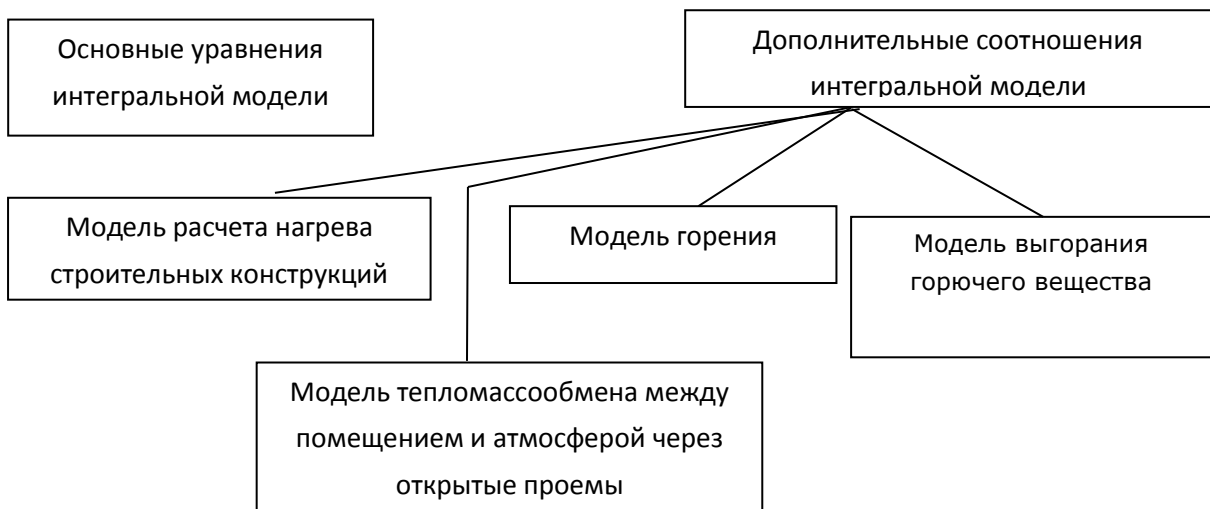


Рис. 1.3 – Структура интегральной модели

Интегральная модель – это система обыкновенных дифференциальных уравнений, представляющих собой нестационарные одномерные (по времени) дифференциальные уравнения, выражающие законы сохранения массы и энергии для всей смеси газов в помещении, оптической плотности дыма и

массы для отдельных газов. Дополнительные соотношения (рис. 1.3) используются для замыкания системы уравнений интегральной модели.

Расчет динамики ОФП в атриуме с использованием интегральных моделей некорректен, так как его высота обычно больше максимальной высоты, равной 6 м [41], выше которой нельзя применять эмпирические распределения по высоте величин ОФП (вопрос об справедливости вышеуказанных распределений до сих пор остается открытым для помещений, высота которых меньше 6 м). Следовательно, локальные значения ОФП в атриуме, например, на уровнях рабочих зон галерей, нельзя корректно определять по их среднеобъемным величинам.

Область корректного применения интегральной модели (по объемам и геометрии помещений, расположению горючего материала и т.д.) является нерешенной проблемой.

Существенными недостатками интегральных моделей, увеличивающими погрешность результатов расчета и суживающими область их достоверного использования, являются:

- описание состояния смеси газов в помещении с помощью среднеобъемных величин в период критической продолжительности пожара (эвакуация людей), когда неоднородность основных параметров состояния газовой среды достаточно велика;

- не учитывается геометрическая форма помещения, а также расположение очага пожара относительно ограждающих конструкций, проемов, систем естественной и механической вентиляции;

- теплообмен между газовой средой и ограждающими конструкциями, а также потери излучения через открытые и прозрачные проемы описывается посредством эмпирических формул, имеющих ограниченную область применения;

- величины ОФП на уровне рабочей зоны помещения не зависят от вида, свойств, места расположения горючего материала и геометрии помещения;

- расчет распределений по высоте и длине помещения локальных значений ОФП, необходимых для решения большинства практических задач, таких как, обеспечение безопасной эвакуации людей и т.д., требует дополнительных математических зависимостей, которые можно получить из эксперимента или из расчетов с использованием зонной или полевой моделей;

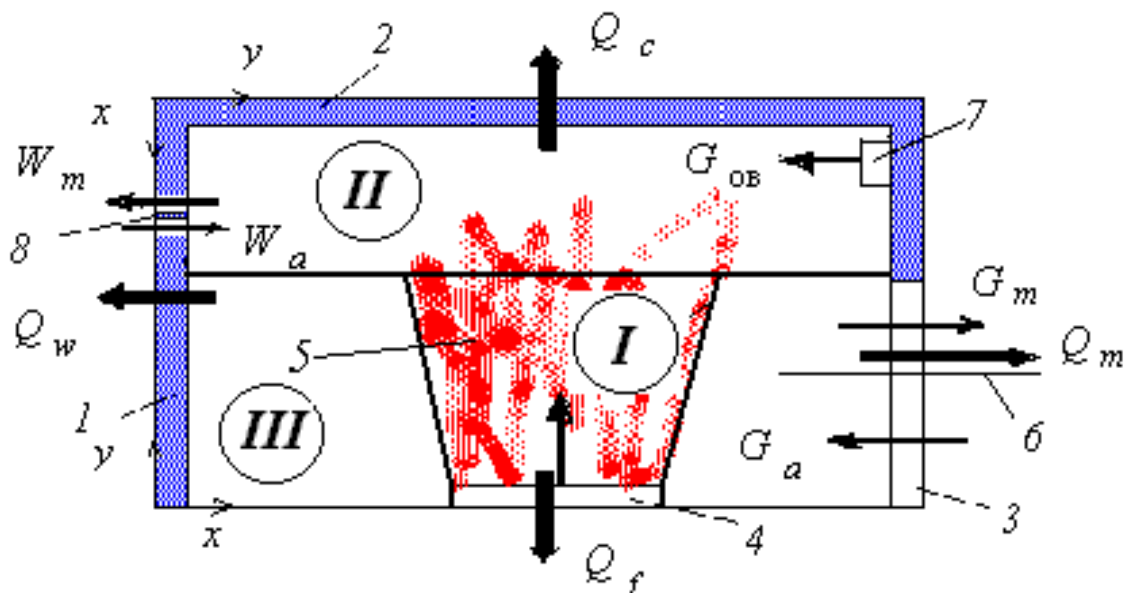
- при моделировании массообмена через естественную вентиляцию (оконные и дверные проемы) не учитывается пространственная неоднородность распределения внутреннего давления газовой среды помещения (например, давление уменьшается по мере удаления от конвективной колонки очага пожара);

- не учитывается влияние функционирования системы дымоудаления (СДУ), в частности её время включения и объемный расход, на динамику удельной массовой скорости выгорания жидкости.

В зонной модели [41], представленной на рис. 1.4, помещение разделяется на несколько зон, параметры теплообмена в которых определяются с использованием уравнений законов сохранения энергии и массы.

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 и расположением горючего вещества других предположений [41].

Теплофизические свойства смеси газов можно более точно задать в каждой зоне. Можно, например, применять формулы для расчета тепловых потоков, отводимых в строительные конструкции помещения, расположенные по границам данной зоны. Обычно, в таких моделях применяются уравнения, отражающие закономерности гидродинамического и теплового обтекания струйным течением поверхностей строительных конструкций (условное разбиение на характерные части течения [4]: критическая (лобовая) точка, ускоренное течение, переходная область и автомоделное течение).



1 – стены помещения; 2 – потолок помещения; 3 - открытый проем; 4 - горючее вещество; 5 - очаг горения; 6 – плоскость равных давлений; 7 - система пожаротушения; 8 – системы противодымной и приточной вентиляции; I – зона конвективной колонки; II – зона припотолочного слоя; III – зона холодного воздуха

Рис. 1.4 – Схема тепломассообмена в помещении при использовании зонной модели

Принимаются следующие упрощения сложной физической картины пожара:

- припотолочный слой принимается равномерно прогретым и задымленным, а также плоскопараллельным потолку помещения в любой момент времени;
- время формирования припотолочного слоя пренебрежимо мало по сравнению с характерными временами эвакуации людей;
- зоны холодного воздуха и припотолочного слоя разделены условной границей с пренебрежимо малой толщиной, в случае перехода через которую термо- и газодинамические параметры смеси газов резко изменяются;
- тепломассообмен между зонами припотолочного слоя и холодного воздуха отсутствует;

- на параметры конвективной колонки, теплоотвода в ограждающие конструкции и тепломассообмена с окружающей средой через открытые проемы геометрическое положение горючего вещества в помещении не влияет.

Уравнения зонной модели получены при следующих основных допущениях:

- присутствие дыма учитывается только в коэффициентах теплопотерь из зон конвективной колонки и припотолочного слоя (доли массы и тепловой энергии, которыми обладают мелкодисперсные твердые частицы дыма, пренебрежимо малы в сравнении с соответствующими долями газовой фазы [41]) и в уравнении закона сохранения оптической плотности дыма [41];

- конвективная колонка является неограниченной свободно-конвективной струей;

- конвективная колонка рассматривается как «квазиодномерная» и стационарная, т. е. осредненные по поперечному сечению конвективной колонки термогазодинамические параметры смеси газов изменяются в каждый момент времени только вдоль ее высоты;

- параметры тепломассообмена через открытые проемы с атмосферой и теплоотвода в строительные конструкции помещения не зависят от геометрического положения горючего вещества в помещении;

- смесь газов является идеальной, состоящей из идеальных газов (кислород, азот, окись и двуокись углерода и т.п.), свойства которых при атмосферном давлении близки к идеальным;

- теплофизические свойства смеси газов, такие как, показатель адиабаты, газовая постоянная, удельная изобарная теплоемкость, принимаем такими же как у сухого воздуха (различие между термодинамическими свойствами воздуха и продуктов горения мало в диапазоне температур, характерном для пожара).

На рис. 1.5 приведена структура зонной модели. Расчет динамики ОФП в атриуме с использованием зонных моделей более обоснован по сравнению с интегральными моделями. Это связано с тем, что в зонных моделях более точно

отражена реальная термогазодинамическая картина пожара в атриуме (например, образование припотолочного газового слоя).

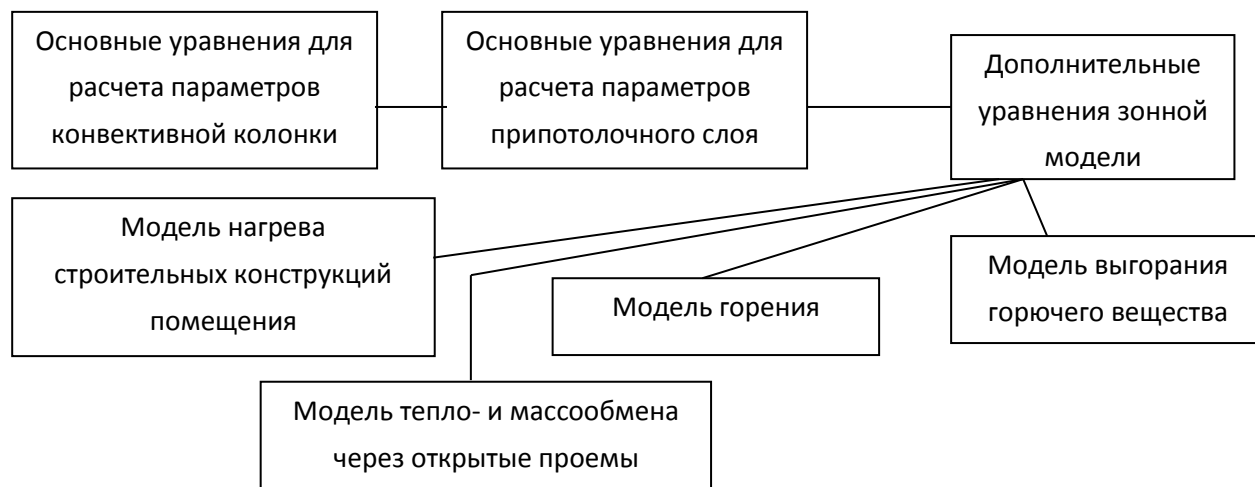


Рис. 1.5 – Структура зонной модели

Припотолочный газовый слой при сложной геометрии перекрытия, как показано в ряде работ [69, 76], не является равномерно прогретым и задымленным, плоскопараллельным перекрытию атриума. Конвективная колонка не может рассматриваться как неограниченная свободно-конвективная струя [74]. Эти две особенности развития пожара противоречат основным положениям зонного подхода.

Простые численные методы (например, метод Рунге-Кутты [39]) могут использоваться для решения замкнутой системы дифференциальных уравнений зонной модели. Аналитическое решение системы уравнений существует только в простых случаях [41].

Основные недостатки зонных моделей следующие:

- в случае сложной термогазодинамической картины пожара основные допущения зонной модели (равномерно прогретый припотолочный слой и т.д.) не соответствуют реальным условиям;

- дополнительная экспериментальная или теоретическая информация требуется из-за выделения конвективной колонки, расположенной над очагом горения, в отдельную зону, так как конвективная колонка не может

рассматриваться как свободная струя, распространяющаяся в неограниченном пространстве;

- распределения параметров смеси газов вдоль различных направлений в пределах каждой зоны, (как и в интегральных моделях), задаются из дополнительных теоретических или экспериментальных исследований и зависят от конструктивных и объемно-планировочных решений помещений (главным образом, от их геометрических характеристик).

Полевые (дифференциальные) модели [69, 159] дают наиболее детальное описание термогазодинамики пожара. Основным достоинством полевых моделей является то, что искомыми параметрами являются трехмерные нестационарные поля температур, концентраций компонентов смеси газов, скоростей, давлений и частиц дыма во всем объеме помещения.

Дифференциальные (полевые) модели являются наиболее сложными при их математическом описании из-за того, что они представляют собой систему нестационарных, трехмерных, дифференциальных уравнений в частных производных (законы сохранения энергии, массы и импульса). Замыкание системы уравнений проводится с использованием дополнительных соотношений для расчета турбулентного теплообмена и лучистого теплопереноса.

Работы по совершенствованию моделирования термогазодинамики пожара интенсивно ведутся в Англии, Австралии, России, США и других странах.

Ряд сложных, не решенных до конца проблем теплообмена, возникает при разработке полевых моделей:

- расчет турбулентного теплообмена в условиях горения при совместном воздействии одновременно действующих, возмущающих течение факторов (нестационарность, неизотермичность, сжимаемость, излучение, поперечный и продольный, положительный и отрицательный градиенты давления, наличие газовой, твердой и жидкой фаз и т.д.);

- расчет параметров лучистого теплопереноса в двух- или трехфазной, оптически неоднородной смеси газов и частиц дыма при турбулентном горении с учетом его взаимного влияния на конвективный теплообмен;

- расчет характеристик нагрева и газификации горючего вещества из-за теплового воздействия пламени.

Основные недостатки полевых моделей следующие:

- сложно детализировать особенности течения одновременно на поверхности стен и потолка помещения, вблизи дымоудаляющих отверстий и в пламенной зоне и т.п. из-за ограниченного числа точек конечно-разностной сетки (возможности современных ЭВМ);

- при проведении многочисленных оптимизационных или вариантных расчетов с использованием полевых моделей требуются большие затраты машинного времени даже на быстродействующих ЭВМ, и в этом случае полевые модели неэффективны.

В случае сложной термогазодинамической картины пожара (например, в помещениях большой высоты и объема) обосновать выбор моделей лучистого теплопереноса и турбулентности невозможно из-за недостаточного объема экспериментальной информации.

Современные методы численного решения замкнутой системы дифференциальных уравнений дифференциальной модели достаточно подробно разработаны и апробированы с использованием большого объема теоретических и экспериментальных исследований [41, 64, 106, 144] термогазодинамики пожара в помещении.

Среди современных программ для ЭВМ, реализующих решение различных прикладных задач теплообмена, при пожаре можно выделить Fire Dynamics Simulator [145]; PHOENICS (используется конечно-разностная схема SIMPLE [64]) [159]; SOFIE (специализированная программа, решающая трехмерные математические модели термогазодинамики пожара) [162], программы, разработанные д.т.н., проф. Пузачем С.В. [70, 71] и др.

В сложных специфических термогазодинамических условиях развития пожара необходимо тестирование любой из вышеперечисленных программ на экспериментальной или теоретической информации о тепломассообмене в конкретных условиях пожара. Поэтому для пользователей программ появляется необходимость в дополнительных весьма трудоемких усилиях по их модернизации и настройке. В то же время, результат может быть и не достижим, так как невозможно вносить все требуемые уточнения и изменения в исходный листинг программы непосредственно.

Финансовые возможности исследователя также ограничивают работу с программным кодом. Большая трудоемкость освоения, тестирования и настройки программы для решения конкретных задач также должна приниматься во внимание.

Следовательно, актуальной задачей является разработка индивидуальных программ расчета на ЭВМ динамики ОФП.

1.4. Моделирование работы системы дымоудаления

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. Вышеуказанное явление получило название “plugholing” в зарубежной литературе [141].

В отечественных литературных источниках начало исследования нерасчетного режима работы СДУ “plugholing” выполнено только в нескольких работах [10-13].

В интегральной и зонной моделях работа СДУ учитывается в граничных условиях, однако моделируется только расчетный режим работы, а режим “plugholing” рассматривается только в одной работе [13] для зонной модели в случае работы СДУ с искусственным побуждением.

В вышеупомянутой статье получены формулы для определения начала “plugholing” и коэффициент уменьшения расхода удаляемого дыма при основном допущении о том, что воронка под дымоудаляющим отверстием имеет симметричную форму. Поэтому необходимо продолжение исследований.

В интегральной и зонной моделях на расчетном режиме расход удаляемой смеси газов и дыма в случае СДУ с естественным побуждением определяется по простым полуэмпирическим одномерным соотношениям (например, в [17, 43]), которые имеют следующие основные недостатки, обусловленные неучетом трехмерности течения:

- продольная скорость потока вдоль перекрытия в припотолочном слое перед дымоудаляющим отверстием принимается равной нулю;
- вертикальный градиент давления в припотолочном слое определяется по средней температуре помещения или припотолочного слоя;
- не обоснована величина гидравлического сопротивления дымоудаляющего отверстия.

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. Недостатки одинаковы с соответствующими для СДУ с естественным побуждением.

Наиболее точно расход через дымоудаляющее отверстие может быть определен с использованием полевой модели. Однако необходимо достаточно точно и подробно задавать граничные условия на дымоудаляющем отверстии или присоединять дополнительную расчетную область воздуха снаружи помещения. Кроме того, необходим предварительный расчет по интегральной или зонной моделям с целью приближенного выбора параметров СДУ, что позволит резко уменьшить количество трудоемких расчетов по полевой модели и избежать режима “plugholing”.

1.5. Выводы по первой главе

1. Пожар в МЦ может привести к значительным человеческим жертвам и крупному материальному ущербу.

2. Среди всех технических проблем, встающих перед проектировщиками зданий МЦ, в том числе с атриумными пространствами, проблемы противопожарной безопасности являются наиболее острыми.

3. На стадии проектирования или при реконструкции МЦ необходимо моделирование динамики ОФП с целью обеспечения безопасной эвакуации людей при пожаре и эффективной работы систем пожарной безопасности.

4. Во всех типах математических моделей существуют допущения и упрощения реальной физической картины пожара, что приводит к существенному снижению точности расчета параметров смеси газов и теплообмена.

5. 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.

6. Необходима разработка комплекса математических моделей расчета динамики ОФП в МЦ, включающего уточненные модели пожара, которые

учитывают специфику объемно-планировочных и конструктивных решений МЦ, например, наличие атриумов.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА В МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЦЕНТРАХ

2.1. Интегральная математическая модель

Рассматриваем модификацию [69] интегральной модели [41]. Отличие используемой модели от приведенной в [41] заключается в следующем:

- прогрев строительных конструкций помещения выполняется с использованием нестационарных двумерных уравнений теплопроводности;
- распределение температуры по высоте помещения учитывается более полно [69].

Основные уравнения модели, полученные на основе законов сохранения массы и энергии с учетом влияния систем противодымной и приточной вентиляции, следующие:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \Psi + G_a + \rho_a W_a - G_m - \rho_m W_m, \quad (2.1)$$

$$\frac{d}{d\tau} \left(\frac{p_m V}{k_m - 1} \right) = \Psi \eta Q_{\text{н}}^{\text{р}} + c_{pa} T_a (G_a + \rho_a W_a) - \\ - c_{pm} T_{\text{мпр}} (G_m + \rho_m W_m) - Q_s - Q_{\text{пр}}, \quad (2.2)$$

$$V \frac{d(X_{\text{O}_2} \rho_m)}{d\tau} = -\eta L_{\text{O}_2} \Psi + X_{\text{O}_2 a} (G_a + \rho_a W_a) - X_{\text{O}_2 \text{мпр}} (G_m + \rho_m W_m), \quad (2.3)$$

где

τ (с) – время от начала пожара;

Ψ (кг/с) – скорость (массовая) газификации горючего вещества;

G_a, G_m (кг/с) – расходы (массовые) наружного воздуха и смеси продуктов горения и воздуха через проемы;

W_a, W_m (м³/с) – расходы (объемные) противодымной и приточной вентиляции;

V (м³) – объем рассматриваемого помещения;

ρ_a (кг/м³) – плотность атмосферного воздуха;

ρ_m (кг/м³) – плотность (среднеобъемная) смеси газов в помещении;
 p_m (Па) – давление (среднеобъемное) в помещении;
 k_m – показатель адиабаты смеси газов помещения;
 Q_H^p (Дж/кг) – рабочая низшая теплота сгорания пожарной нагрузки;
 η – полнота горения;
 Q_s (Вт) – тепловой (суммарный) поток, поступающий в стены, перекрытие и пол;
 $Q_{пр}$ (Вт) – лучистый тепловой поток, проходящий через проемы наружу;
 $T_{mпр} = a_T T_m$ (К) – температура (средняя) смеси газов, выходящих наружу через открытые проемы;
 a_T – коэффициент, показывающий отличие средней температуры выходящих наружу смеси газов от температуры (среднеобъемной) газовой смеси в помещении;
 T_a (К) – температура атмосферного воздуха;
 c_{pa}, c_{pm} (Дж/(кг·К)) – изобарные удельные теплоемкости воздуха и газовой смеси;
 L_{O_2} (кг/кг) – коэффициент потребления кислорода;
 X_{O_2m} – массовая (среднеобъемная) концентрация кислорода в помещении;
 X_{O_2a} – массовая (среднеобъемная) концентрация кислорода в атмосферном воздухе;
 $X_{O_2mпр} = a_{O_2} X_{O_2m}$ – массовая (средняя) концентрация кислорода в смеси газов, выходящей наружу через открытые проемы;
 a_{O_2} – коэффициент, показывающий отличие концентрации (среднемассовой) кислорода в смеси выходящих наружу газов от ее среднеобъемной концентрации в газовой смеси помещения.

Мощность тепловыделения определяется из формулы [41]:

$$Q_{\text{пож}} = \eta \psi_{\text{уд}} Q_H^p F_{\text{г}}, \quad (2.4)$$

где $Q_{\text{пож}}$ (Вт) – мощность тепловыделения;

$\psi_{\text{уд}}$ (кг/(м²·с)) – удельная массовая скорость газификации горючего вещества;

$F_{\text{г}}$ (м²) – площадь поверхности горения горючего вещества.

Полнота сгорания определяется массовой концентрацией кислорода и в первом приближении определяется из формулы [69]:

$$\eta = \eta_o (2\bar{X} - \bar{X}^2), \quad (2.5)$$

где η_o – полнота сгорания в атмосферном воздухе;

$$\bar{X} = (X_{O2m} - X_{O2min}) / (X_{O2a} - X_{O2min});$$

$X_{O2min} = 0,14$ – максимальная концентрация (массовая) кислорода при прекращении пламенного горения.

Когда высота нейтральной плоскости находится в диапазоне $z_H < z^* < z_B$ (“смешанный” режим газообмена), расход (массовый) смеси газов, выходящей наружу через проем, определяется по формуле [41]:

$$G_m = 2/3 \sqrt{2g\rho_m(\rho_a - \rho_m)} \xi b_{пр} (z_B - z^*)^{1,5}, \quad (2.6)$$

где

ξ – коэффициент, учитывающий гидравлическое сопротивление открытого проема;

g (м/с²) – ускорение свободного падения;

z (м) – вертикальная координата, начало которой находится на уровне пола помещения;

z_B, z_H (м) – соответственно координаты верхнего и нижнего краев открытого проема помещения;

z^* (м) – высота плоскости равных давлений;

$b_{пр}$ (м) – ширина открытого проема.

В работе [69] представлены условия однозначности задачи (начальные, геометрические, физические и граничные) условия и метод численного решения дифференциальных уравнений.

2.2. Зонная модель

2.2.1. Основные допущения

Смесь газов в помещении можно рассматривать как открытую термодинамическую систему, которая обменивается энергией и массой с атмосферным воздухом через открытые проемы и ограждающие конструкции помещения. Среда помещения состоит из фаз:

- газовая смесь (азот, кислород, продукты газификации и горения горючего вещества);
- мелкодисперсные твердые частицы дыма;

Зонный метод расчета динамики ОФП [41, 69] разработан на основе фундаментальных законов природы – законы сохранения энергии, массы и импульса. Зонная математическая модель подразумевает деление внутреннего объема помещения на характерные зоны. Количество и размеры зон задаются из условия минимизации неоднородностей параметров (температура, концентрации газов и т.д.) смеси газов в пределах каждой из зон. Иногда в основе разбиения на зоны лежат другие предположения, которые вытекают из задач исследований, расположения горючего вещества и т.п. [69].

Наиболее апробированной можно принять модель, в которой внутренний объем газовой среды помещения разбивается на три зоны [41]:

- зона I – зона конвективной колонки, включающая пламенную область;
- зона II – зона припотолочного слоя;
- зона III – зона холодного воздуха.

Схема тепломассообмена в смеси газов помещения в случае трехзонной модели представлена на рис. 2.1. Направления течения смеси газов и тепловые потоки обозначены стрелками. Обозначения на рис. 2.1:

Ψ_r (кг/с) – скорость (массовая) газификации горючего вещества;

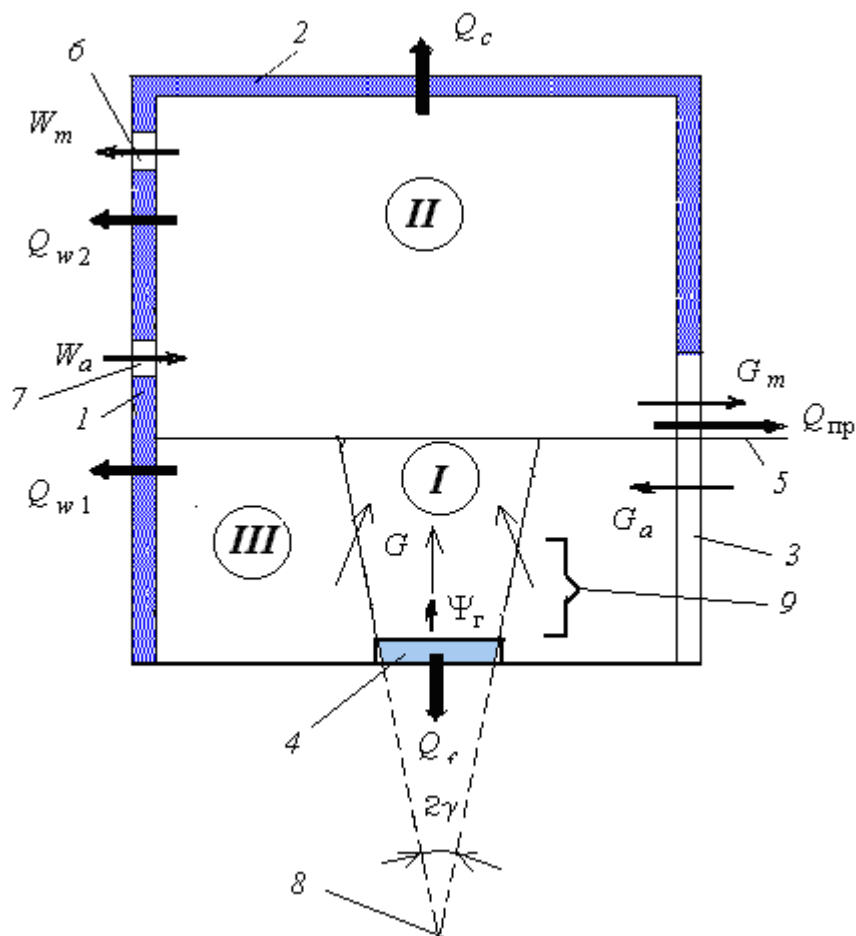
G_a , G_m (кг/с) – расходы (массовые) наружного воздуха, поступающего в помещение, и смеси газов, вытекающих наружу, под действием естественного газообмена через открытые проемы;

W_m ($\text{м}^3/\text{с}$) – расход (объемный) системы противодымной вентиляции;

W_a ($\text{м}^3/\text{с}$) – расход (объемный) системы приточной вентиляции;

$Q_{\text{пр}}$ (Вт) – лучистый тепловой поток, отводимый наружу через открытые проемы;

Q_c , Q_{w1} , Q_{w2} , Q_f (Вт) – суммарные тепловые потоки, отводящиеся в перекрытие помещения, стены помещения (ниже и выше нижней границы припотолочного слоя) и пол помещения.



1 – стены помещения; 2 – потолок помещения; 3 – открытый проем; 4 – горючее вещество; 5 – нижняя граница зоны припотолочного слоя; 6 – противодымная вентиляция; 7 – приточная вентиляция; 8 – «фиктивный» (точечный) источник тепловыделения; 9 – высота пламени.

Рис. 2.1. Схема тепломассообмена в смеси газов помещения

Сделаем следующие упрощения, касающиеся термо- и газодинамической картины пожара.

Предполагается, что условная граница пренебрежимо малой толщины разделяет зоны холодного воздуха и припотолочного слоя. Переход через эту границу характеризуется резким изменением термогазодинамических параметров смеси газов.

Принимаем, что газовая смесь является идеальной газовой смесью из-за того, что при давлении, близком к атмосферному, свойства реальных газов, входящих в состав смеси, таких как, кислород, азот, монооксид и двуокись углерода и др. близки к свойствам идеальных газов. Теплофизические свойства газовой смеси, такие как, газовая постоянная, удельная изобарная теплоемкость и показатель адиабаты, принимаем равными соответствующим свойствам сухого воздуха из-за того, что отличие термодинамических свойств продуктов горения и воздуха в диапазоне температур, характерных для пожара в помещении, мало.

При расчете термогазодинамических параметров смеси газов не учитываем наличие частиц дыма из-за того, что доли массы и тепловой энергии в общей массе смеси газов, приходящиеся на твердые частицы дыма, пренебрежимо малы в сравнении с соответствующими величинами смеси газов.

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 «предистория» процесса не принимается во внимание.

Радиационные и оптические свойства смеси газов в помещении учитывают влияние мелкодисперсных частиц дыма через использование оптической плотности дыма [41].

На параметры конвективной колонки, теплоотвода в ограждающие конструкции и тепломассообмена с окружающей средой через открытые проемы геометрическое положение горючего вещества в помещении не влияет.

Замкнутую систему уравнений зонной модели можно разделить на структурные части, которые отражают моделируемые ими термогазодинамические или химические процессы, согласно рис. 2.2.

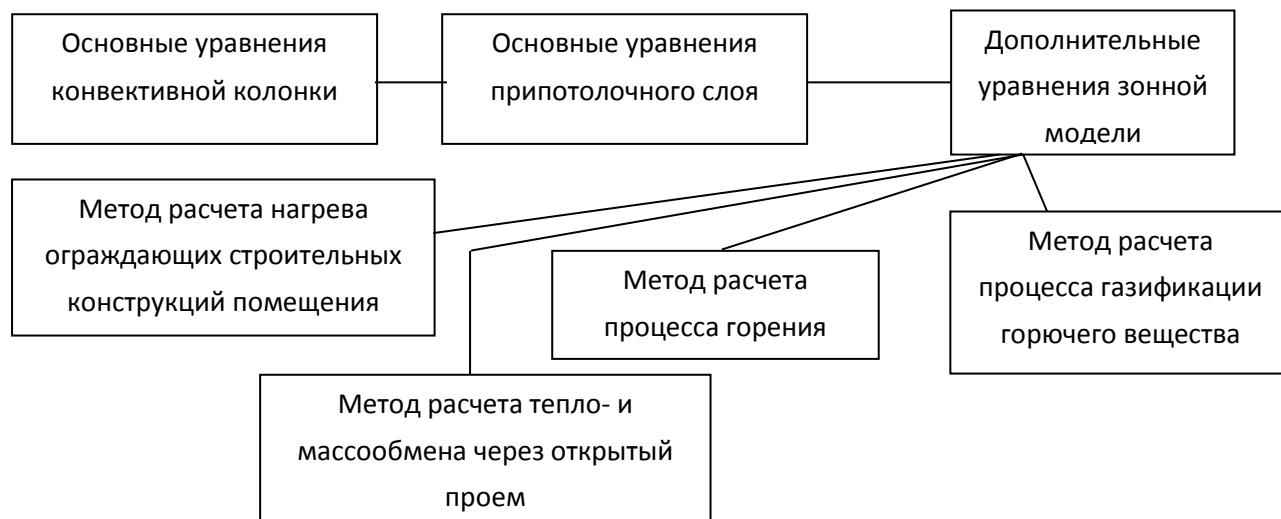


Рис. 2.2. Структурная схема зонной модели

2.2.2. Основные уравнения модели

Для решения практических задач пожарной безопасности нужно уметь рассчитывать зависимости от высоты колонки следующих осредненных (в поперечном сечении колонки) параметров:

- расход (массовый) смеси газов и воздуха;
- температура смеси газов и мелкодисперсных частиц дыма;
- эффективная степень черноты смеси газов.

Массовые расходы и средние температуры смеси газов в поперечных сечениях конвективной колонки могут быть определены с использованием двух основных подходов:

- тепловыделение в области горения задается в виде точечного источника, который расположен ниже поверхности горючего вещества (полуэмпирический подход [14, 41], при этом расположение источника

тепловыделения не соответствует реальной картине пожара, и поверхность горючего вещества считается условно проницаемой);

- тепловыделение в области горения принимается в виде распределенного источника, при этом вышеуказанный источник располагается над поверхностью горючего вещества (полуэмпирический и эмпирический метод [14, 150]), что соответствует реальной картине пожара.

При первом подходе [14, 41]:

$$G = 0,21 \left[\frac{g \rho_0^2 Q_{\text{пож}} (1 - \chi)}{c_p T_0} \right]^{\frac{1}{3}} (z + z_0)^{\frac{5}{3}}, \quad (2.7)$$

$$T = T_0 + \frac{Q_{\text{пож}} (1 - \chi)}{c_p G}, \quad (2.8)$$

где T (К) – средняя температура по сечению колонки;

G (кг/с) – расход (массовый) смеси газов через сечение колонки на высоте z от поверхности горючего вещества;

T_0 (К) – температура воздуха в помещении перед пожаром;

ρ_0 (кг/м³) – плотность воздуха в помещении перед пожаром;

c_p (Дж/(кг·К)) – удельная изобарная теплоемкость смеси газов;

$\chi = Q_{wl} / Q_{\text{пож}}$ – доля, равная отношению отводящейся в строительные конструкции теплоты к выделившейся в пламенной зоне;

z (м) – координата по высоте помещения поперечного сечения колонки, начало которой совпадает с открытой поверхностью горючего вещества;

$z_0 = 1,5 \sqrt{F_r}$ (м) – расстояние от поверхности горючего вещества до фиктивного источника тепловыделения;

g (м/с²) – ускорение свободного падения.

Расход (массовый) по сечению конвективной колонки для второго подхода при использовании эмпирического метода определяется как [14, 150]:

$$\text{при } z > z_{\text{пл}}: G = 0,071 \left(\frac{Q_{\text{пож}} (1 - \chi)}{1000} \right)^{1/3} z^{5/3} + 1,8 \cdot 10^{-6} Q_{\text{пож}} (1 - \chi), \quad (2.9)$$

$$\text{при } z \leq z_{\text{пл}}: G = 0,032 \left(\frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{1000} \right)^{3/5} z, \quad (2.10)$$

где $z_{\text{пл}} = 0,166 \left(\frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{1000} \right)^{2/5}$ – высота зоны горения, м.

Массовый расход, определяемый с помощью полуэмпирического метода [74], находится из численного решения уравнения:

$$\frac{dG}{dz} = \frac{Bz(r + ztg\gamma)^4}{T_0 A G (GT_0 + Bz)} + \frac{2Gtg\gamma}{r + ztg\gamma} - \frac{B}{T_0} \left(1 - \frac{2ztg\gamma}{r + ztg\gamma} \right), \quad (2.11)$$

где $A = \frac{T_0 R^2}{g p_0^2 \pi^2}$ ($\text{с}^2 \cdot \text{м}^5 / (\text{кг}^2 \cdot \text{К})$) и $B = \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{z_f c_p}$ ($\text{кг} \cdot \text{К} / (\text{м} \cdot \text{с})$) – размерные

комплексы;

R (Дж/(кг·К)) – газовая постоянная смеси газов;

r (м) – эквивалентный радиус открытой поверхности горючего вещества;

γ (рад) – угол полуоткрытия колонки.

Средняя температура по сечению конвективной колонки находится из формулы (2.8).

Уравнение (2.11) можно уточнить, принимая во внимание следующие особенности теплообмена в помещении:

- выше пламенной зоны конвективной колонки присутствуют тепловые потери на излучение;

- угол полуоткрытия колонки меняется по высоте колонки.

Схема расчета тепло- и массообмена в элементарном объеме смеси газов конвективной колонки приведена на рис. 2.3.

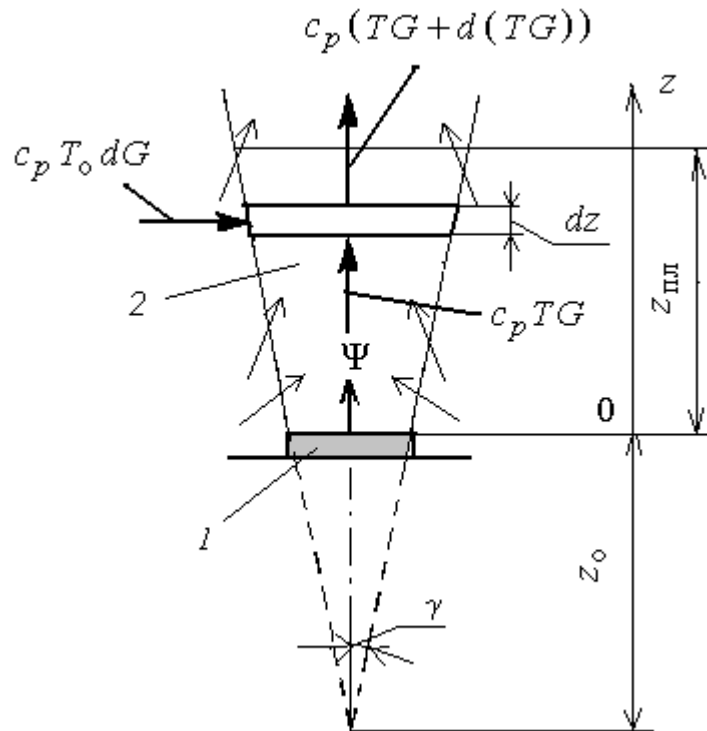
Принимаем в качестве допущения, что суммарная мощность тепловыделений равномерно распределена от поверхности горючего вещества до высоты, где заканчивается пламенная зона.

Для смеси газов, находящейся внутри элементарного объема высотой dz в пламенной зоне конвективной колонки, можно записать дифференциальное уравнение закона сохранения энергии при «квазиодномерном» подходе:

$$c_p(GT + d(GT)) = c_p(GT + T_0 dG) + \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{z_{\text{пл}}} dz, \quad (2.12)$$

где G (кг/с) – расход (массовый) смеси газов и дыма, проходящих через поперечное сечение колонки на высоте z ;

T (К) – средняя температура смеси газов и дыма, проходящих через поперечное сечение колонки на высоте z .



1 – горючее вещество; 2 – зона тепловыделения

Рис. 2.3. Схема расчета тепло- и массообмена в элементарном объеме конвективной колонки

Уравнение закона сохранения импульса для газовой смеси и дыма, находящейся внутри контрольного объема высотой dz конвективной колонки, в соответствии с рис. 2.3 имеет вид

$$\frac{d(\rho w_z^2)}{dz} = -\frac{dp}{dz} - \rho g, \quad (2.13)$$

С помощью уравнений (2.12) и (2.13) можно уточнить уравнение (2.11):

$$\frac{dG}{dz} = \frac{B \cdot z \cdot F^2(z)}{T_0 A \cdot G \cdot (G \cdot T_0 + B \cdot z) \cdot \pi^2} + \frac{2G \cdot \text{tg} \gamma}{\sqrt{F(z)/\pi}} - \frac{B}{T_0} \cdot \left(1 - \frac{2z \cdot \text{tg} \gamma}{\sqrt{F(z)/\pi}}\right), \quad (2.14)$$

где $F(z)$ – площадь поперечного сечения колонки на высоте z , м^2 .

Если пренебречь величиной $c_p dGdT$, имеющей второй порядок малости в сравнении с членами уравнения первого порядка малости, то из выражения (2.12) можно получить:

$$\frac{d}{dz} [G(T - T_o)] = B_{\text{кк}}, \quad (2.15)$$

где $B_{\text{кк}} = \frac{Q_{\text{пож}}(1 - \chi)}{z_{\text{пл}} c_p}$ ($\text{кг} \cdot \text{К} / (\text{м} \cdot \text{с})$) – размерный комплекс.

После интегрирования уравнения (2.15) по высоте $z = 0$ (поверхность пола помещения) до текущей координаты z , с использованием уравнения, выражающего закон сохранения импульса для смеси газов и распределения статического давления по высоте помещения в зоне холодного воздуха, можно получить:

$$A_{\text{кк}} \frac{GT}{F_{\text{кк}}} \frac{d}{dz} \left(\frac{GT}{F_{\text{кк}}} \right) = \frac{B_{\text{кк}}}{G} z, \quad (2.16)$$

где

$$A_{\text{кк}} = \frac{R_o^2 T_o}{g p_o^2} \quad (\text{с}^2 \cdot \text{м}^5 / (\text{кг}^2 \cdot \text{К})) \text{ – размерный комплекс;}$$

$F_{\text{кк}}$ (м^2) – площадь поперечного сечения конвективной колонки, расположенного на высоте z .

В отличие от работы [74] принимаем, что выше пламенной зоны потери лучистой энергии существенны:

$$\frac{d}{dz} [G c_p (T - T_o)] = Q_p. \quad (2.17)$$

Здесь Q_p ($\text{Вт}/\text{м}$) – потери на излучение на 1 м высоты колонки:

$$Q_p = \varepsilon_{\text{кк}} (T^4 - T_c^4) \frac{dF_p}{dz}, \quad (2.18)$$

где

$\varepsilon_{\text{кк}}$ – степень черноты смеси газов;

T_c (К) – средняя температура поверхностей стен и потолка помещения;

F_p (м²) – площадь излучающей поверхности.

Для расчета температуры после нахождения расхода решается уравнение (2.8).

Основные допущения при расчете параметров нагретого задымленного припотолочного слоя принимаются следующими:

- газовый припотолочный слой плоскопараллелен потолку помещения в любой момент времени;
- тепло- и массообмен между холодным воздухом и припотолочным слоем отсутствует.

Расчет высоты нижнего края припотолочного слоя проводится с помощью численного решения дифференциального уравнения, выражающего закон сохранения энергии смеси газов в припотолочном слое:

$$\frac{dz_k}{dt} = -\frac{G_k}{\rho_o F_{\Pi}} - \frac{Q_{\text{пож}}(1-\varphi)}{c_p \rho_o T_o F_{\Pi}} + \frac{\rho_a T_a W_a}{\rho_o T_o F_{\Pi}} - \frac{T_2(\rho_2 W_m + G_m)}{\rho_o T_o F_{\Pi}}, \quad (2.19)$$

где

z_k (м) – высота от открытой поверхности горючего вещества до нижнего края припотолочного слоя;

F_{Π} (м²) – площадь перекрытия помещения;

G_k (кг/с) – расход (массовый) смеси газов, поступающих в припотолочный слой из конвективной колонки;

T_2 (К) – среднеобъемная температура смеси газов в припотолочном слое;

ρ_2 (кг/м³) – среднеобъемная плотность смеси газов в припотолочном слое;

$\varphi = \frac{Q_{w1} + Q_{w2} + Q_c + Q_f}{Q_{\text{пож}}}$ – коэффициент теплопотерь.

Среднеобъемные плотность и температура смеси газов в припотолочном слое определяется с помощью решения дифференциального уравнения, выражающего закон сохранения массы смеси газов в припотолочном слое, и уравнения состояния идеального газа:

$$V \frac{d\rho_2}{dt} = G_k + \rho_a W_a - G_m - k_T \rho_2 W_m, \quad (2.20)$$

$$p_2 \approx p_0 = \rho_2 RT_2, \quad (2.21)$$

где p_2 (Па) – давление в припотолочном слое;

p_0 (Па) – давление атмосферного воздуха на высоте $z = 0$;

R (Дж/(кг·К)) – газовая постоянная смеси газов;

$k_T = \frac{T_2}{T_w}$ – коэффициент, который учитывает разницу между локальной

температурой T_w смеси газов, входящих наружу через систему противодымной вентиляции, и среднеобъемной температурой припотолочного слоя.

2.2.3. Условия однозначности задачи

Условия однозначности задачи состоят из геометрических, физических, начальных и граничных условий.

Геометрическими условиями в зонной модели являются:

- габаритные размеры помещения, ограниченные внутренними поверхностями ограждающих строительных конструкций: ширина, длина и высота;

- линейные размеры открытых, а также вскрывающихся (разрушение остекления под воздействием высокой температуры) проемов: высота от пола до нижней z_n и верхней z_v границы проемов, а также ширина проема $b_{пр}$;

- размеры открытой поверхности горючего вещества: площадь F_r (длина l_r и ширина b_r в случае прямоугольной формы, радиус при круговом распространении пламени и т.д.);

- толщины всех слоев многослойных строительных конструкций.

Физические условия в зонной модели состоят из:

- теплофизических свойств смеси газов в помещении, воздуха и огнетушащего вещества: удельных изобарных (массовых) теплоемкостей c_{pm} , c_{pa} , $c_{пов}$; газовых постоянных R_m , R_a ;

- теплофизических свойств материалов строительных конструкций (в том числе, каждого слоя многослойной конструкции): плотностей, теплоемкостей и

коэффициентов теплопроводности (средних или в зависимости от температуры) $\rho_w, c_w, \lambda_w, \rho_c, c_c, \lambda_c, \rho_f, c_f$ и λ_f ;

- параметров горючего вещества: удельной (массовой) скорости газификации Ψ_o , низшей рабочей теплоте сгорания Q_p^H , удельного коэффициента образования продуктов горения L_i , удельного коэффициента потребления кислорода L_{O_2} , линейной скорости распространения пламени w_r для твердого горючего вещества или времени стабилизации горения τ_{cm} для горючей жидкости, удельного коэффициента дымовыделения D_s ;

- температуры вскрытия $T_{вп}$ проемов, остекление которых разрушается под воздействием высокой температуры.

По границам открытой термодинамической системы, совпадающим с внутренними поверхностями строительных ограждающих конструкций и открытой поверхностью горючего вещества, граничные условия задаются в виде:

- массовой скорости газификации горючего материала Ψ_r ;
- температуры атмосферного воздуха T_a .

По границам открытой термодинамической системы, совпадающим с внутренними поверхностями открытых проемов, граничные условия задаются как:

- массовые расходы смеси газов, выходящей наружу – G_m и поступления наружного воздуха в помещение – G_a ;
- тепловой поток $Q_{пр}$, излучаемого через проемы наружу;
- температура атмосферного воздуха T_a .

В качестве начальных условий (при $\tau = 0$) принимаем:

- дифференциальное уравнение (2.17): $z_k = H - \delta; T_2 = T_o$;
- к уравнению (2.18): $\rho_2 = \rho_o$,

где H (м) – высота помещения; δ (м) – толщина слоя горючего вещества.

Уравнения для расчета процессов газификации и горения горючего вещества такие же, как и для полевой модели.

Дифференциальные уравнения (2.11), (2.14), (2.16), (2.17), (2.19) и (2.20) решаются с использованием численного метода Рунге-Кутты (4-й порядок точности) [39].

2.3. Полевая математическая модель

2.3.1. Основные допущения

Пожар, развивающийся в помещении, является сложным термогазодинамическим процессом, в течение которого происходит одновременное воздействие возмущающих течение факторов: неизотермичность; вдув на стенке (внутренняя деструктуризация материалов строительных конструкций и тепло- и массообменная защита конструкций вызывают поступление в помещение водяного пара и т.д.); лучистый теплоперенос; химические реакции; многофазность (газы + твердые мелкодисперсные частицы дыма + жидкость); кривизна и шероховатость поверхностей строительных конструкций; турбулентность; поперечный и продольный градиенты давления; переход ламинарного течения в турбулентный поток.

Термогазодинамическая картина пожара в помещении имеет следующие основные особенности:

- наибольшая разница давлений в различных частях помещения имеет порядок 2-20 Па (в случае отсутствия детонационного горения);
- скорость движения смеси газов в помещении мала по сравнению со скоростью звука (в случае отсутствия детонационного горения);
- тепловой режим в помещении определяется тепловыми эффектами химических реакций;
- процессы турбулентной диффузии необходимо учитывать.

Основные упрощения и допущения реальной физической картины пожара в помещении принимаем следующими:

- можно использовать равновесное уравнение состояния, так как локальное термодинамическое и химическое равновесие существует во всех частях помещения;
- смесь газов в помещении является идеальной в диапазонах изменения температур и давлений, характерных для дефлаграционного горения в помещении;
- используем односкоростную и однотемпературную модель динамики сплошных сред, пренебрегающую межфазным взаимодействием (температурный скачок и “скольжение” фаз друг относительно друга пренебрежимо малы), в которой локальные скорости и температуры компонентов смеси газов, твердых и жидких частиц равны друг другу в каждой точке помещения;
- химическая реакция горения рассматривается как одноступенчатая и необратимая;
- ионизация и диссоциация смеси газов при высоких температурах пренебрежимо мала;
- теплофизические свойства среды не подвержены влиянию турбулентных пульсаций;
- взаимное влияние турбулентности и лучистого потока пренебрежимо мало;
- удельная скорость газификации горючего вещества определяется на основе экспериментальных данных без учета обратного влияния пламенной зоны на скорость газификации;
- термо- и бародиффузия пренебрежимо мала.

Таким образом, смесь газов, находящихся в помещении, является сжимаемым, вязким, теплопроводным идеальным газом.

2.3.2. Основные уравнения модели

Уравнения, лежащие в основе полевой модели расчета динамики ОФП, являются выражениями фундаментальных физических законов – законов сохранения энергии, массы и импульса. Запишем основные дифференциальные

уравнения полевой модели в случае ортогональной системы координат. Координатную ось x направим вдоль длины помещения, ось y – параллельно ширине помещения и ось z – по высоте помещения.

Используемые в полевой модели основные дифференциальные уравнения [69], являющиеся нестационарными и трехмерными, имеют приведенный далее вид.

Уравнение неразрывности для смеси газов:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho w_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho w_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w_z) = 0, \quad (2.22)$$

где ρ (кг/м³) – плотность;

τ (с) – время;

w_x, w_y, w_z (м/с) – проекции скорости на оси x, y и z соответственно.

Проекция уравнения движения на координатные оси:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_x}{\partial t} + \rho w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial w_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right); \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_y}{\partial t} + \rho w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial w_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial y} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right); \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_z}{\partial t} + \rho w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - (\rho - \rho_o)g + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial y} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right), \end{aligned} \quad (2.25)$$

где μ (кг/(с·м)) – коэффициент динамической вязкости;

p (Па) – статическое давление;

μ_t (кг/(с·м)) – коэффициент турбулентной вязкости;

ρ_o (кг/м³) – плотность чистого воздуха;

g (м/с²) – ускорение свободного падения.

Уравнение энергии в случае смеси газов можно записать в виде:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda + \lambda_\tau + \lambda_p) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\lambda + \lambda_\tau + \lambda_p) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((\lambda + \lambda_\tau + \lambda_p) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v, \quad (2.26)$$

где T (К) – локальная температура смеси газов;

c_p (Дж/(кг·К)) – изобарная удельная теплоемкость;

λ (Вт/(м·К)) – коэффициент молекулярной теплопроводности смеси газов;

λ_p (Вт/(м·К)) – коэффициент радиационной теплопроводности в смеси газов;

λ_τ (Вт/(м·К)) – коэффициент турбулентной теплопроводности в смеси газов;

q_v (Вт/м³) – мощность внутренних источников (стоков) теплоты, ($q_v = q_{vk} + q_{vp}$, где

q_{vp} (Вт/м³) – мощность внутренних источников теплоты вследствие

радиационного теплообмена; q_{vk} (Вт/м³) – мощность внутренних источников

теплоты других физических процессов).

Для расчета массовых концентраций компонентов газовой смеси используется уравнение неразрывности в виде:

$$\rho \frac{\partial X_i}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial X_i}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial X_i}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial X_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho(D + D_\tau) \frac{\partial X_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho(D + D_\tau) \frac{\partial X_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho(D + D_\tau) \frac{\partial X_i}{\partial z} \right) + m_i, \quad (2.27)$$

где X_i – концентрация (массовая) i -го газа газовой смеси;

D (м²/с) – коэффициент молекулярной диффузии i -го газа смеси газов;

D_τ (м²/с) – коэффициент турбулентной диффузии в смеси газов;

m_i (кг/(с·м³)) – мощность внутренних источников (или стоков) массы, появляющихся вследствие образования (или исчезновения) молекул i -го газа из-за присутствия химических реакций.

Для расчета оптической плотности дыма используется дифференциальное уравнение закона ее сохранения [69]:

$$\frac{\partial D_{\text{оп}}}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial D_{\text{оп}}}{\partial x} + w_y \frac{\partial D_{\text{оп}}}{\partial y} + w_z \frac{\partial D_{\text{оп}}}{\partial z} = m_{\text{оп}}, \quad (2.28)$$

где $D_{\text{опг}}$ (Нп·м²/кг) – дымообразующая способность горючего вещества;

$D_{\text{оп}}$ (Нп/м) – оптическая плотность дыма;

$m_{\text{оп}}=D_{\text{опг}}\Psi_{\Gamma}/\Delta V$ (Нп/(м·с)) – мощность внутренних источников по образованию оптической плотности дыма вследствие протекания реакций горения;

ΔV (м³) – объем смеси газов, внутри которой располагается источник (или сток) рассматриваемого параметра.

2.3.3. Замыкающие соотношения

Так как количество искомых параметров, находящихся в системе дифференциальных уравнений (2.22)-(2.28), больше числа уравнений, то для решения системы уравнений необходимо ввести дополнительные соотношения.

Уравнение состояния газовой смеси используется для локальных параметров:

$$p = \rho RT, \quad (2.29)$$

где R (Дж/(кг·К)) – газовая постоянная газовой смеси.

Теплофизические параметры смеси газов определяются из уравнений:

$$\rho = \sum_{i=1}^n r_i \rho_i; \quad R = \sum_{i=1}^n g_i R_i; \quad c_p = \sum_{i=1}^n g_i c_{pi}, \quad (2.30)$$

где i – номер газа в смеси газов;

n – количество газов в смеси;

$r_i, g_i, R_i, c_{pi}, \rho_i$ – массовая и объемная доли, газовая постоянная, изобарная удельная теплоемкость и плотность i -ого газа в смеси газов.

Теплоёмкости отдельных газов задаются постоянными или в виде их зависимости от температуры смеси газов, k - ϵ модель турбулентности [111] используется для расчета турбулентного тепло- и массообмена при пожаре. Турбулентная вязкость рассчитывается по формуле Колмогорова [50]:

$$v_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.31)$$

где

$k = \frac{1}{2}(w_x'^2 + w_y'^2 + w_z'^2)$ ($\text{м}^2/\text{с}^2$) – кинетическая энергия турбулентного движения;

$$\varepsilon = \nu \left[\left(\frac{\partial w_x'}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_y'}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_z'}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (\text{м}^2/\text{с}^3) \quad \text{– скорость диссипации}$$

кинетической энергии турбулентного движения;

w_x', w_y', w_z' ($\text{м}/\text{с}$) – проекции вектора пульсаций скорости на оси x, y, z ;

$C_\mu=0,09$ – эмпирическая константа;

v_T, ν ($\text{м}^2/\text{с}$) – соответственно коэффициенты кинематической турбулентной и молекулярной вязкости.

Кинетическая энергия турбулентного движения и скорость диссипации этой энергии находится из решения дифференциальных уравнений законов сохранения этих величин:

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial k}{\partial x} + w_y \frac{\partial k}{\partial y} + w_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + v_T \left(\frac{\partial w_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) + \frac{g}{Pr_T} \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \varepsilon; \quad (2.32)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + w_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} v_T \left(\frac{\partial w_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) + \frac{g}{Pr_T} \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (2.33)$$

В общепринятой k - ε модели турбулентности эмпирические константы равны $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$. Принимаем, что в конвективной колонки $C_1 = 1,6$.

Для расчета коэффициентов турбулентной теплопроводности в газовой смеси λ_t , входящего в уравнение энергии (2.26) и турбулентной диффузии каждого газа смеси D_t , входящего в уравнения неразрывности (2.27), применяется тройная аналогия Прандтля: если числа Прандтля и Льюиса равны единице ($Pr=Le=1$) и отсутствует градиент давления в потоке смеси газов ($dp/dx=0, dp/dy=0, dp/dz=0$), то уравнение энергии (2.26), движения (2.23)-(2.25) и диффузии (2.27) имеют тождественный вид, то есть при подобии граничных условий есть подобие полей температур, скоростей и концентраций отдельных газов смеси.

Принимаем турбулентное и диффузионное числа Прандтля равными единице: $Pr_t=Pr_d=1$. В этом случае величину коэффициента турбулентной теплопроводности можно найти из выражения [50]:

$$\lambda_{\square} = \frac{c_p \mu_{\square}}{Pr_{\square}}; \quad (2.34)$$

а коэффициент турбулентной диффузии составляет:

$$D_t = \mu_t / \rho Pr_d. \quad (2.35)$$

С помощью решения дифференциальных уравнений (2.31)-(2.35) можно найти коэффициенты турбулентной теплопроводности, вязкости и диффузии, которые входят в уравнения дифференциальной модели (2.23)-(2.27).

Для расчета характеристик радиационного теплопереноса в общем виде необходимо решить интегро-дифференциальное уравнение, описывающее перенос лучистой энергии в смеси газов [63]:

$$s \nabla I_{\lambda}(x, s) + (\alpha_{\lambda} + \beta_{\lambda}) I_{\lambda}(x, s) = \alpha_{\lambda} I_{\lambda_0}(x, s) + \frac{\beta_{\lambda}}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\lambda}(x, s') \gamma_{\lambda}(s, s') d\omega', \quad (2.36)$$

где $\alpha_{\lambda}, \beta_{\lambda}$ – спектральные коэффициенты, характеризующие поглощение и рассеяние энергии излучения;

$\gamma_{\lambda}(s, s')$ – спектральная индикатриса рассеяния энергии излучения;

ω' – телесный угол вдоль направления s' ;

$I_\lambda(x,s)$, $I_{\lambda_0}(x,s)$ – спектральная интенсивность лучистого потока в локальной точке x в направлении s рассматриваемого и абсолютно черного тел.

Для решения интегро-дифференциального уравнения переноса лучистой энергии (2.36) можно использовать достаточно точные и универсальные численные способы, например, применяя зональный метод или стохастический метод Монте-Карло. Главным недостатком этих методов является их несовместимость с сеточными численными методами, используемыми при решении дифференциальных уравнений переноса энергии и импульса дифференциальной модели расчета динамики ОФП. Поэтому требуются разные численные алгоритмы для решения уравнений переноса лучистой энергии и тепло- и массообмена, что может привести к значительному усложнению программы расчета на ЭВМ. Из-за этой причины используются разные приближенные подходы к решению уравнения (2.36).

Интегро-дифференциальное уравнение (2.36) можно представить в виде дифференциального уравнения второго порядка, подобного уравнениям энергии и импульса, с использованием простых приближенных методов расчета переноса лучистой энергии и радиационного теплообмена в смеси газов (поточный, диффузионный или моментный). Диффузионный метод имеет более высокую точность при увеличении оптической плотности (когда числа Бугера больше единицы). Поточный метод наиболее часто используется для решения задач, связанных с горением, но имеет существенно меньшую точность по сравнению с моментным методом. Серьезным недостатком использования этих методов является невозможность оценки их точности при отсутствии для рассматриваемых условий задачи точного решения исходного уравнения или экспериментальных данных.

Наиболее часто при моделировании термогазодинамики пожара используются четыре приближенных математических подхода к расчету лучистого теплопереноса [69]:

- неизлучающий оптически прозрачный газ;
- приближение с помощью оптически тонкого слоя газа;

- приближение с помощью оптически толстого слоя газа;
- диффузионный метод (или метод моментов).

В каждом из этих методов предполагается существование локального термодинамического равновесия внутри излучающего объема смеси газов.

В случае приближения неизлучающего оптически прозрачного газа в уравнении энергии (2.26) принимается:

- коэффициент лучистой теплопроводности равен $\lambda_p=0$;
- источниковый член $q_{vp}=0$.

В случае приближения оптически толстого слоя при его оптической толщине $\tau_o \gg 1$, когда средняя длина свободного пробега фотона пренебрежимо меньше характерного размера задачи, $q_{vp}=0$, а величина коэффициента лучистой теплопроводности составляет:

$$\lambda_p = \frac{16}{3} \frac{\sigma T^3}{k_p}, \quad (2.37)$$

где k_p (1/К) – локальный интегральный коэффициент ослабления лучистой энергии;

T (К) – локальная температура газового слоя.

В случае гетерогенной среды, характерно для пожара, также возникает необходимость выполнять расчет процессов образования, движения и коагуляции твердых частиц дыма с целью нахождения концентрации и размеров частиц, что, главным образом, определяет поглощательную, излучательную и пропускательную способности смеси газов. В этом случае величину коэффициента ослабления излучения можно рассчитать как

$$k_p = \frac{n\pi d^2}{4},$$

где d (м) – средний эффективный диаметр твердых частиц дыма;

n (1/м³) – объемная концентрация твердых частиц дыма.

При оптически тонком слое, когда $\tau_o \ll 1$, принимаем, что величина $\lambda_p=0$, и источниковый член в уравнении энергии записывается в виде:

$$q_{vp}=4\pi\epsilon_p\sigma T^4, \quad (2.38)$$

где ϵ_p – интегральная степень черноты смеси газов.

В случае промежуточной величины оптической толщины слоя газа можно использовать метод моментов (диффузионный метод). Тогда $\lambda_p=0$, а источниковый член в уравнении энергии составляет [5]:

$$q_{vp} = -\frac{4\pi}{3} \left(\frac{\partial^2 I_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial z^2} \right), \quad (2.39)$$

где I_o (Вт/м²) – интенсивность лучистого теплового потока, которая находится с помощью решения уравнения:

$$\frac{1}{k_p} \left(\frac{\partial^2 I_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial z^2} \right) = 3\chi(I_o - I_b(T)), \quad (2.40)$$

где χ (1/м) – интегральный коэффициент излучения;

$I_b(T)=\sigma T^4$ (Вт/м²) – плотность излучения абсолютно черного тела.

В случае применения закона Кирхгофа:

$$\epsilon_p=1-e^{-k_p L}, \quad (2.41)$$

где ϵ_p – интегральная степень черноты газового слоя, имеющего толщину L .

С помощью рассчитанной оптической плотности дыма находятся величины коэффициентов ослабления и поглощения излучения [69]:

$$k_p=\chi=\lambda^* D_{оп}, \quad (2.42)$$

где $D_{оп}$ (Нп/м) – локальное значение оптической плотности дыма;

λ^* (1/Нп) – коэффициент, с помощью которого проводится пересчет оптического диапазона излучения в инфракрасный.

Значительная неоднородность твердых частиц дыма по размерам и форме, процессы коагуляции, дробления и горения частиц при их распространении определяют чрезвычайную сложность расчета локальных характеристик смеси газов с частицами дыма (поглощательная, испускающая и рассеивающая способности).

Пламенная зона задается с помощью внутренних источников энергии и массы или с использованием экспериментально измеренных полей температур

и других параметров смеси газов. С помощью более полного учета энергетических спектральных характеристик излучающей смеси газов с твердыми частицами дыма (в то числе, и в видимой части излучения), влияния характеристик частиц дыма, неравновесности излучения, взаимного влияния излучения на характеристики турбулентности и взаимодействия излучения с поверхностями строительных конструкций можно совершенствовать расчет характеристик лучистого теплопереноса на основе непосредственного численного решения интегро-дифференциального уравнения во всем объеме помещения.

Характеристики процесса газификации горючего вещества рассчитываются следующим способом. Удельная скорость (массовая) газификации горючего вещества может быть рассчитана с помощью следующих полуэмпирически формул [41]:

для горючей жидкости:

$$\tau \leq \tau_{ст} : \quad \Psi_{\Gamma} = \Psi_o F_{\Gamma} \sqrt{\frac{\tau}{\tau_{ст}}} ; \quad (2.43)$$

$$\tau > \tau_{ст} : \quad \Psi_{\Gamma} = \Psi_o F_{\Gamma} , \quad (2.44)$$

где τ (с) – время от начала пожара;

$\tau_{ст}$ (с) – время стабилизации горения горючей жидкости;

F_{Γ} (м²) – площадь поверхности горючей жидкости, на которой происходит горение;

Ψ_o (м²) – удельная (массовая) скорость газификации горючей жидкости;

для горючего твердого тела:

$$\Psi_{\Gamma} = \Psi_o F_{\Gamma} , \quad (2.45)$$

где $F_{\Gamma} = \pi r^2$; $r = w_{лс} \tau$ (м) – радиус горения;

$w_{лс}$ (м/с) – линейная скорость, с которой пламя распространяется по поверхности горючего вещества.

При натекании в помещение горючего газа задаются скорость, давление и температура, а также размеры отверстия, через которое газ поступает в

помещение.

2.3.4. Условия однозначности задачи

Для решения замкнутой системы дифференциальных уравнений полевой модели необходимо задать условия однозначности задачи в следующем виде.

I. Геометрические условия задачи:

- габаритные размеры помещения (ширина, длина и высота) по внутренним поверхностям ограждающих конструкций $B \times L \times H$;
- координаты открытых проемов;
- координаты открытой поверхности твердого или жидкого горючего вещества или отверстия, через которое поступает горючий газ в помещение;
- координаты отверстий системы противодымной вентиляции;
- координаты отверстий системы приточной вентиляции;
- координаты теплообменных поверхностей системы отопления;
- координаты отверстий подачи огнетушащего вещества системы пожаротушения.

II. Физические условия задачи:

- теплофизические свойства газов, входящих в газовую смесь;
- теплофизические свойства материалов ограждающих строительных конструкций;
- характеристики горючего вещества (низшая рабочая теплота сгорания, удельная массовая скорость газификации, удельный коэффициент образования продуктов горения, удельный коэффициент потребления кислорода, линейная скорость распространения пламени для твердого горючего вещества или время стабилизации горения для горючей жидкости, удельный коэффициент дымовыделения).

III. Граничные условия:

- 1) внутренние поверхности ограждающих строительных конструкций:

- проекции скоростей смеси газов равны нулю (условие «прилипания»):

$$w_x = w_y = w_z = 0;$$

- в уравнении энергии: $q_{\Sigma} = q_{\text{л}} + q_{\text{к}}$,

где $q_{\text{л}}$ (Вт/м²) – плотность теплового потока, обусловленного излучением; $q_{\text{к}}$ (Вт/м²) – плотность теплового потока, обусловленного конвекцией;

- конвекция: задаются коэффициент теплоотдачи α , который определяется, используя критериальные уравнений теплоотдачи или интегральную математическую модель расчета пограничного слоя, и температура на внешней границе пограничного слоя;

- другие параметры, для Φ : предполагается $\partial\Phi/\partial n = 0$, где n – нормаль к поверхности;

- отверстия системы противодымной вентиляции: проекция скоростей на ось, которая перпендикулярна плоскости отверстия, равна $w_{\text{в}} = W_{\text{выт}}/\rho$,

где $W_{\text{выт}}$ (м³/с) – производительность (объемная) противодымной вентиляции;

$w_{\text{в}} = W_{\text{пр}}/\rho_{\text{а}}$, $W_{\text{пр}}$ (м³/с) – производительность (объемная) приточной вентиляции;

- отверстие, через которое поступает газообразное огнетушащее вещество в помещение: $w_{\text{ов}} = G_{\text{ов}}/(\rho_{\text{ов}}F_{\text{ов}})$,

где $G_{\text{ов}}$ (кг/с) – массовый расход; $F_{\text{ов}}$ (м²) – площадь отверстия, через которое поступает огнетушащее вещество в помещение;

2) поверхность открытого проема:

- зона истечения наружу смеси газов: все параметры Φ определяются как $\partial\Phi/\partial n = 0$;

- зона поступления внутрь помещения воздуха, находящегося снаружи помещения: температура, давление и концентрации отдельных газов принимаются как для атмосферного воздуха (смесь кислорода и азота);

3) наружные поверхности строительных конструкций (стены и потолок помещения):

- интенсивность суммарного теплового потока составляет $q_{\Sigma} = q_{\text{л}} + q_{\text{к}}$;

- конвекция: температура равна температуре атмосферного воздуха T_a , величины коэффициентов теплоотдачи определяются с помощью критериальных уравнений: $Nu=C(Gr\cdot Pr)^n$, в которых коэффициенты C и n для горизонтальных и вертикальных поверхностей определяются произведением двух чисел подобия $Gr\cdot Pr$;

- плотность лучистого теплового потока составляет $q_{\text{л}} = \varepsilon_w \sigma (T_w^4 - T_a^4)$;

- атмосферный воздух: температура T_a , скорость ветра w_w и давление p_a находятся согласно формуле

$$\frac{p_a}{p_1} = e^{-\frac{g}{RT_0}z}, \quad (2.46)$$

где p_1 (Па) – статическое давление снаружи на высоте пола помещения.

IV. Начальные условия задачи (при $\tau=0$):

- неподвижная смесь (воздух) кислорода и азота заполняет помещение:

$$X_{O_2} + X_{N_2} = 1; X_{O_2}=0,23; X_{N_2}=0,77; X_{H_2}=0; w_x = w_y = w_z = 0;$$

параметры смеси газов:

- температура T_0 ;

- распределение статического давления по высоте помещения:

$$\frac{p_0}{p_1} = e^{-\frac{g}{RT_0}z};$$

- массовая скорость газификации горючего вещества: $\Psi_r=0$.

2.3.5. Метод решения системы уравнений

При решении трехмерных нестационарных уравнений в частных производных (2.20)-(2.26), (2.30) и (2.31) используется конечно-разностный метод контрольных объемов [64]. Дискретный аналог уравнений в случае трехмерной задачи имеет вид:

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + a_T \Phi_T + a_B \Phi_B + b, \quad (2.47)$$

где $a_E = D_E A(|P_E|) + [|-F_E, 0|]$; $a_N = D_N A(|P_N|) + [|-F_N, 0|]$; $a_T = D_T A(|P_T|) + [|-F_T, 0|]$;

$a_W = D_W A(|P_W|) + [|F_W, 0|]$; $a_S = D_S A(|P_S|) + [|F_S, 0|]$; $a_B = D_B A(|P_B|) + [|F_B, 0|]$;

$a_p^0 = \rho_p^0 \Delta x \Delta y \Delta z / \Delta \tau$; $a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_T + a_B + a_p^0 - S_p \Delta x \Delta y \Delta z$; $b = S_C \Delta x \Delta y \Delta z + a_p^0 \Phi_p^0$;

ρ_p^0 – величина плотности на предыдущем временном шаге;

Φ_p^0 – величина функции на предыдущем временном шаге;

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – шаг расчета вдоль координатных осей, соответствующих Ox, Oy, Oz ;

$\Delta \tau$ – временной шаг расчета;

$$A(|P|) = \left[0, (1 - 0,1|P|)^5 \right]$$

Для решения системы алгебраических уравнений (2.47) необходима следующая последовательность:

- 1) необходимо задать поле давления (приближенно) $p^* = f(x, y, z)$;
- 2) определяются поля скоростей w_x^* , w_y^* и w_z^* с помощью решения алгебраических уравнений (2.47), которые соответствуют уравнениям движения (2.23)-(2.25);
- 3) определяется поле поправок давления p' с помощью решения уравнения (2.22);
- 4) производится расчет скорректированного поля давлений $p = p^* + p'$;
- 5) выполняется расчет полей проекций скоростей на координатные оси;
- 6) определяются поля остальных физических параметров задачи (температура, концентрации компонентов газовой смеси, коэффициенты тепло- и массопереноса, теплофизические свойства) из решения алгебраических уравнений (2.47), которые соответствуют уравнениям неразрывности смеси газов (2.22) и ее отдельных газов (2.27), уравнению энергии смеси газов (2.26), уравнений модели турбулентности k - ε (2.32) и (2.33);

7) скорректированное давление p принимается как новое p^* и расчет начинается снова с пункта 2.

Алгоритм повторяется до получения сходящегося решения, когда отличие параметров смеси газов на соседних итерациях меньше заранее заданной величины (например, $|T^{(k+1)} - T^{(k)}| < 0.01$, где $k+1, k$ – номер текущей и предыдущей по времени итерации).

2.4. Расчет расхода системы противодымной вентиляции

Наиболее распространенными методами расчета, которые используются в России и за рубежом, являются следующие.

Расход (массовый) системы противодымной вентиляции равен согласно [161]:

$$G_{sm} = C\beta d^{5/2} \left(\frac{T_2 - T_0}{T_2} \right)^{1/2} \left(\frac{T_0}{T_2} \right)^{1/2}, \quad (2.48)$$

где G_{sm} (кг/с) – расход (массовый) системы противодымной вентиляции;

d (м) – толщина слоя смеси газов под отверстием системы противодымной вентиляции (или толщина припотолочного слоя);

β – коэффициент, который характеризует расположение отверстий системы противодымной вентиляции;

$C = 3,13$.

В соответствии с [161], значение $\beta = 2,0$ рекомендуется в случае расположения вытяжных отверстий на потолке помещения рядом со стенами или на стенах рядом с потолком, и $\beta = 2,8$ в случае расположения отверстий на потолке вдалеке от стен.

Критический расход (массовый) системы противодымной вентиляции, когда еще не происходит захват холодного воздуха из соответствующей зоны (в дымоходы системы противодымной вентиляции поступает только смесь газов из припотолочного слоя), равен согласно работе [161]:

$$G_{cr} = \frac{1,33\rho_0 \{gd^5 T_0 (T_2 - T_0)\}^{1/2}}{T_2}, \quad (2.49)$$

где G_{cr} (кг/с) – критический расход (массовый) системы противодымной вентиляции.

В формулах (2.48) и (2.49) отсутствуют размеры (или площадь) отверстий системы противодымной вентиляции, которые существенно влияют на термогазодинамическую картину течения вблизи них. Это является существенным недостатком вышеупомянутых выражений.

Расход (массовый) системы противодымной вентиляции определяется как [17, 18]:

$$G_{sm} = 0,03Q_c^{3/5} z_B, \quad (2.50)$$

где Q_c (Вт) – тепловая конвективная мощность, выделяющаяся в очаге горения; z_B (м) – высота от уровня пола незадымляемой зоны помещения.

Производительность системы противодымной вентиляции равна согласно [17, 18]:

$$G_{sm} = 0,188\Pi z_B^{3/2}, \quad (2.51)$$

где Π (м) – периметр пламенной зоны.

Выражение (2.51) корректно при $\Pi < 12$ м и $z_B < 4$ м [17, 18].

Формулы (2.48)-(2.51) получены в конкретных условиях проведения экспериментов, не отвечают требованиям теории подобия процессов тепло- и массообмена, и в основе их вывода лежат два основных допущения:

- конвективная колонка, образующаяся над источником пожара, считается неограниченной свободно-конвективной струей;
- влияние изменения по времени параметров припотолочного газового слоя не принимается во внимание, то есть термогазодинамическая картина пожара рассматривается как «квазистационарная».

Следовательно применение выражений (2.48)-(2.51) при прогнозировании динамики ОФП в помещениях с большой высотой некорректно из-за невозможности обеспечения выполнения необходимых и достаточных условий теории подобия [41, 69], что требует уточнения вышеуказанных формул к конкретным условиям развития пожара.

2.5. Методика прогнозирования времени блокирования путей эвакуации

Расчет динамики ОФП в помещениях МЦ, который определяет время блокирования путей эвакуации ОФП, состоит из нескольких этапов:

- подготовка исходных данных;
- выбор наиболее опасных сценариев развития динамики ОФП;
- выбор математической модели;
- выбор способа численного решения;
- выполнение расчетов с использованием ЭВМ;
- анализ полученных результатов расчетов.

На рис. 2.4 приведена блок-схема методики выполнения расчётов динамики ОФП.

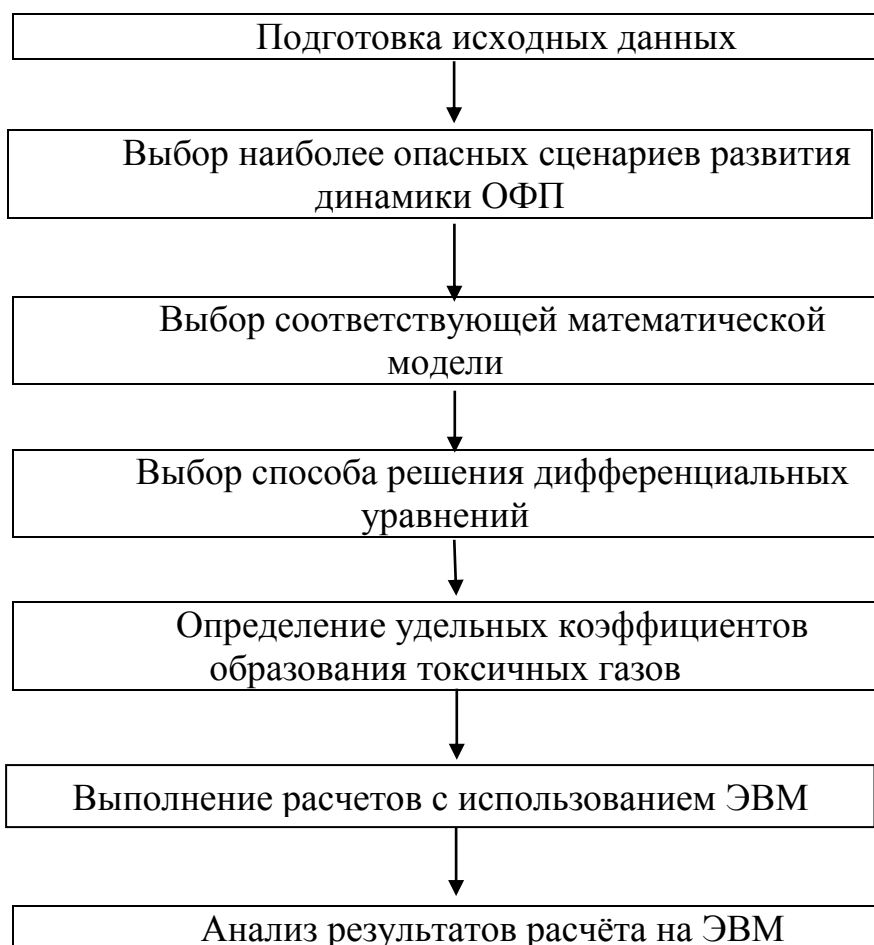


Рис. 2.4. Блок-схема методики выполнения расчётов динамики ОФП

Подготовка исходных данных для решения задачи состоит из выбора численных величин параметров, входящих в математические модели, на основе анализа следующих материалов:

- объемно-планировочные и конструктивные решения помещений МЦ;
- вид, количество и расположение в помещениях горючих веществ и материалов.

Геометрические характеристики задачи определяются с использованием проектно-конструкторской документации, отражающей объемно-планировочные решения МЦ. Ортогональная система координат привязывается к конкретному помещению. В первую очередь задается расположение центральной точки ортогональной системы координат (например, правый нижний угол помещения). Координатную ось x направляем вдоль длины помещения, ось y - вдоль ширины помещения, а ось z направлена вертикально.

Геометрические характеристики помещения МЦ необходимы следующие:

а) полевая модель:

- помещение:

имеет форму параллелепипеда: длина, ширина и высота;

имеет произвольную форму: для ограждающих строительных конструкций координаты внутренних поверхностей; для дверей в помещении ширину, высоту и координаты одного угла; для горючего вещества координаты расположения границы открытой поверхности.

- двери в помещении: ширина, высота и координаты одного угла;

- окна в помещении: ширина, высота и координаты одного из углов;

- горючее вещество: координаты для границ поверхности.

б) для зонной модели:

- характеристики помещения:

форма параллелепипеда: длина, ширина и высота помещения;

произвольная форма: площадь потолка помещения, высота помещения;

- двери: ширина, высота;

- окна: ширина, высота, координаты одного угла;

- горючее вещество: площадь открытой поверхности.

Характеристики горючих веществ, выбранных с помощью анализа объемно-планировочных решений и функционального назначения помещений МЦ, а также их расположения в помещении, определяются из базы типовой пожарной нагрузки [41]. Для проведения расчетов по всем моделям пожара необходимы следующие параметры горючего вещества:

- удельная массовая скорость выгорания;
- низшая рабочая теплота сгорания;
- линейная скорость распространения пламени в случае твердого горючего вещества;
- время стабилизации горения (для горючей жидкости);
- удельный коэффициент потребления кислорода при горении;
- удельный коэффициент дымовыделения;
- удельные коэффициенты выделения токсичных продуктов горения;
- суммарная масса горючего вещества.

Для выбора используемого при расчете сценария пожара проводится анализ характеристик объекта, позволяющий определить наиболее неблагоприятный вариант развития пожара, характеризующийся наибольшим темпом нарастания величин ОФП в рассматриваемом помещении.

На основе анализа объемно-планировочных решений помещений МЦ согласно методики [22, 54] производится выбор математической модели расчета динамики ОФП.

В соответствии с выбранной математической моделью определяются условия однозначности задачи.

При применении полевой модели для конкретной геометрии помещений разрабатываются трехмерные неравномерные конечно-разностные сетки, разбивающие внутренние объемы помещений и строительных конструкций на контрольные объемы.

Расчет на ЭВМ заканчивается в момент прекращения горения по следующим причинам:

- полное выгорание горючего вещества в помещении;
- снижение концентрации кислорода в помещении до значения, при котором прекращается горение.

Расчет с использованием интегральной модели позволяет найти зависимости следующих характеристик смеси газов и параметров тепло- и массообмена от времени:

- среднеобъемные температуры, давление, концентрации продуктов горения, кислорода, азота, огнетушащего газа, оптическая плотность дыма и дальность видимости в смеси газов помещения;
- расходы смеси газов, выходящей из помещения наружу, и наружного воздуха, поступающего внутрь помещения, через открытые проемы;
- расходы смеси газов, выходящей из помещения наружу, и наружного воздуха, поступающего внутрь помещения, через проемы систем противодымной и приточной вентиляции;
- средние температуры ограждающих конструкций;
- тепловые потоки, поступающие в ограждающие конструкции помещения.

Расчет с использованием зонной модели позволяет найти зависимости следующих характеристик смеси газов и параметров тепло- и массообмена от времени:

- среднеобъемные температура, давление, концентрации продуктов горения, кислорода, азота и огнетушащего газа, оптическая плотность дыма и дальность видимости в смеси газов, находящейся в припотолочном слое;
- нижняя граница зоны припотолочного слоя;
- зависимости от высоты конвективной колонки массового расхода смеси газов через поперечное сечение колонки, осредненных по поперечному сечению температур и эффективной степени черноты смеси газов;
- расходы смеси газов, выходящей из помещения наружу, и наружного воздуха, поступающего внутрь помещения, через открытые проемы;

- расходы смеси газов, выходящей из помещения наружу, и наружного воздуха, поступающего внутрь помещения, через проемы систем противодымной и приточной вентиляции;

- средние температуры ограждающих конструкций;

- тепловые потоки, поступающие в ограждающие конструкции помещения.

Расчет с использованием полевой модели позволяет найти зависимости следующих характеристик смеси газов и параметров тепло- и массообмена от времени:

- локальная температура, давление, массовые концентрации токсичных газов, продуктов горения, кислорода, азота, огнетушащего газа, оптическая плотность дыма и дальность видимости в смеси газов в помещении;

- расходы смеси газов, выходящей из помещения наружу, и наружного воздуха, поступающего внутрь помещения, через открытые проемы;

- расходы смеси газов, выходящей из помещения наружу, и наружного воздуха, поступающего внутрь помещения, через проемы систем противодымной и приточной вентиляции;

- локальные температуры в ограждающих конструкциях;

- тепловые потоки, поступающие в перекрытие, стены и пол помещения, а также отводящиеся через проемы помещения.

Расчеты динамики ОФП позволяют определить величины критических продолжительностей пожара по отдельным ОФП, что позволяет рассчитать необходимое время эвакуации [41, 54]:

$$\tau_{\text{н}} = \min \left\{ \tau_{\text{кр}}^{\text{п.в.}}, \tau_{\text{кр}}^T, \tau_{\text{кр}}^{\text{т.г.}}, \tau_{\text{кр}}^{\text{O}_2}, \tau_{\text{кр}}^{\text{т.п.}} \right\}, \quad (2.52)$$

где $\tau_{\text{кр}}^{\text{п.в.}}, \tau_{\text{кр}}^T, \tau_{\text{кр}}^{\text{т.г.}}, \tau_{\text{кр}}^{\text{O}_2}, \tau_{\text{кр}}^{\text{т.п.}}$ – критические продолжительности пожара по следующим ОФП: потеря видимости, температура, токсичные продукты горения, кислород и тепловой поток.

2.6. Выводы по второй главе

1. Предложенная методика расчета времени блокирования путей эвакуации ОФП в помещениях многофункциональных центров с применением разработанной модификации зонной модели имеет следующие основные отличия от существующих методик:

- впервые учтена форма конвективной колонки, изменяющаяся из-за влияния ограждающих строительных конструкций помещения и работы систем противодымной и приточной вентиляции;

- впервые в дифференциальное уравнение, выражающее закон сохранения массы припотолочного слоя, введен коэффициент, который учитывает разницу между локальной температурой удаляемой системой противодымной вентиляции смеси газов и среднеобъемной температурой припотолочного слоя.

2. Предложенная методика расчета времени блокирования путей эвакуации ОФП в помещениях многофункциональных центров, использующая модифицированную интегральную и зонную, а также полевыми математическими модели позволяет рассчитать величину необходимого времени эвакуации людей с учетом работы систем противодымной и приточной вентиляции, распределений локальных температур вдоль толщины припотолочного слоя, реальных химических и теплофизических параметров горючих веществ и материалов строительных конструкций помещения.

3. Модифицированная зонная математическая модель позволяет при ее использовании значительно (в десятки раз) сократить трудозатраты на введение исходных данных и время расчета на ЭВМ в случае выполнения многосценарных расчетов динамики ОФП для нахождения необходимого времени эвакуации людей из помещений многофункциональных центров, которое является основой для обеспечения выполнения условия безопасной эвакуации людей.

4. Предложенная методика расчета времени блокирования путей эвакуации ОФП имеет достаточную инженерную точность расчета при решении практических задач пожарной безопасности.

5. Разработан комплекс математических моделей расчета динамики ОФП в МЦ с использованием уточненных моделей пожара, которые учитывают специфику объемно-планировочных и конструктивных решений МЦ, например, наличие атриумов.

ГЛАВА 3. МОДИФИКАЦИЯ ЗОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ФОРМУ КОНВЕКТИВНОЙ КОЛОНКИ

3.1. Постановка задачи

Скорость опускания припотолочного нагретого задымленного газового слоя в высоких помещениях (атриумах, кинотеатрах и т.д.), расположенных в многофункциональных центрах, определяется, в первую очередь, величиной расхода продуктов горения и воздуха в конвективной колонке, который натекает в припотолочный слой.

При использовании зонной математической модели расчета термогазодинамики пожара в качестве основного допущения принимается, что конвективная колонка над источником горения представляет собой неограниченную свободно-конвективную струю [41].

Однако, как показано в работах [74, 75, 153], влияние на форму колонки перекрытия и стен помещения существенно и требует проведения дальнейших исследований. В связи с этим уточнение зонной модели с учетом формы конвективной колонки, образующейся над источником горения и подверженной влиянию ограждающих конструкций помещения, является актуальной научной и практической задачей.

В работах [74, 75, 153] исследование угла раскрытия и формы конвективной колонки выполнено на основе проведения численных экспериментов с использованием трехмерной полевой модели расчета термогазодинамики пожара. Также в этих работах в дифференциальном уравнении для расчета распределения массового расхода по высоте колонки используется средняя величина угла полуоткрытия колонки, в то время как в данной работе учитывается локальное распределение угла полуоткрытия по высоте колонки (уравнение (2.14)). В данной работе теоретическая модель подтверждается результатами проведенных натурных экспериментов.

Целью исследований является теоретическое и экспериментальное изучение угла полураскрытия конвективной колонки в помещении.

3.2. Трехзонная модель расчета тепломассообмена при пожаре

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 [41]. 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. Так, например, при объемном пожаре весь объем помещения можно рассматривать как одну зону.

В принципе, количество зон внутри помещения может быть любым. Так, например, интегральную модель можно рассматривать как однозонную. Выбор количества и размеров проводится из различных предположений, вытекающих из поставленных исследовательских задач. Основным предположением является, по возможности, минимизация неоднородностей полей параметров газовой смеси внутри каждой из зон.

Ряд недостатков, характерных для интегральных моделей, применение зонных моделей позволяет устранить. Например, внутри каждой зоны задаются более точно теплофизические свойства газовой смеси и формулы для определения тепловых потоков, отводящихся в граничные с данной зоной поверхности стен, потолка и пола помещения. В зонных моделях можно применять закономерности гидродинамического и теплового влияния струйных течений на твердые поверхности (область ускоренного течения, критическая точка, автомодельное течение в области высоких чисел Рейнольдса) [4].

Однако зонные модели в дополнение к общим недостаткам интегральных моделей характеризуются дополнительными неточностями:

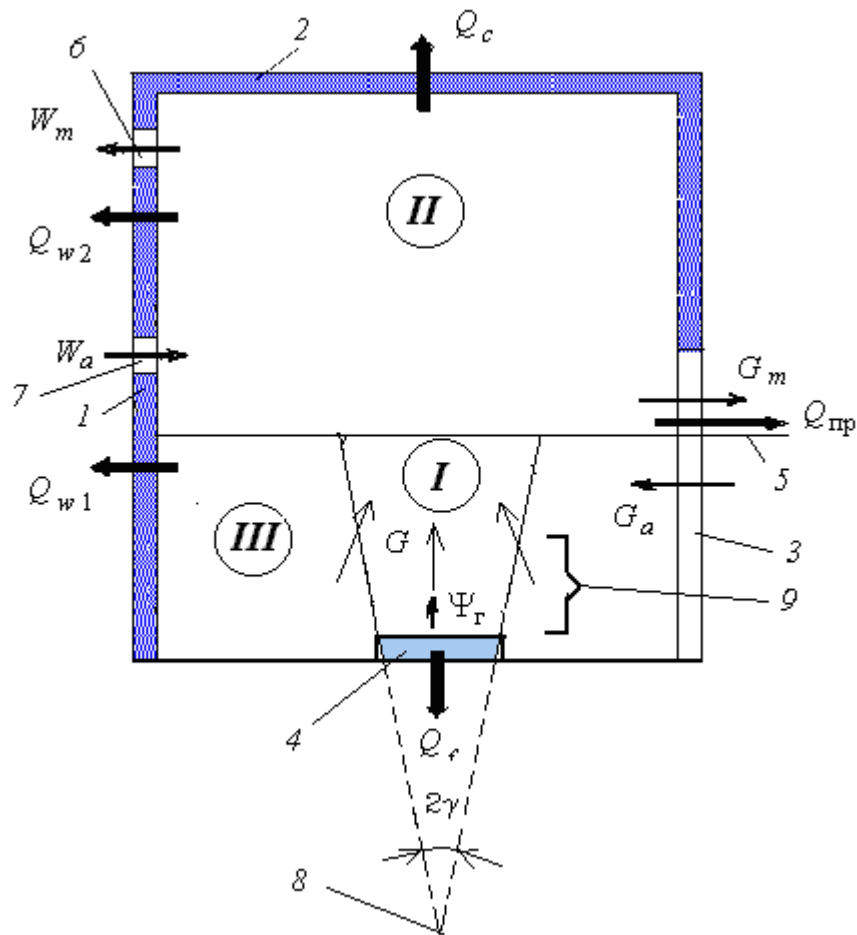
- для расчета параметров газовой смеси внутри зоны конвективной колонки, находящейся непосредственно над пламенем, необходимо использование дополнительных экспериментальных данных, позволяющих определить параметры конвективной струи поперек и вдоль ее продольной оси, так как вышеуказанная струя не является свободно-конвективной струей в неограниченном пространстве (влияние строительных конструкций помещения);

- внутри выделенной зоны поля параметров газовой смеси определяются с использованием дополнительных уравнений (подобно интегральной модели); например, для припотолочного слоя применяются уравнения динамического и теплового пограничного слоя, развивающегося на поверхности перекрытия; можно также использовать результаты, полученные по полевой модели.

Используется зонная (3 зоны) модель с разбиением пространства помещения на зоны конвективной колонки, припотолочного слоя и холодного воздуха [41]. Эта модель корректна, когда очаг горения по размерам существенно меньше размеров рассматриваемого помещения.

На рисунке 3.1 представлена схема тепло и массообмена в помещении, используемая в рассматриваемой зонной модели. Направления тепловых потоков и течения газовой смеси обозначены стрелками.

Данная модель учитывает работу систем дымоудаления и приточной вентиляции. Учесть работу системы пожаротушения в настоящее время не представляется возможным.



1 – стены помещения; 2 – потолок помещения; 3 – открытый проем в стене; 4 – горючее вещество; 5 – нижняя граница слоя; 6 – система противодымной вытяжной вентиляции; 7 – система приточной вентиляции; 8 – «фиктивный» (точечный) источник горения; 9 – высота пламенной зоны колонки; I – конвективная колонка; II – нагретый задымленный припотолочный слой; III – холодный воздух; Ψ_r – скорость (массовая) газификации горючего вещества, кг/с; G_a , G_m – расходы (массовые) наружного воздуха и смеси продуктов горения и воздуха, кг/с; W_m , W_a – объемные расходы системы дымоудаления и приточной вентиляции, м³/с; Q_{pr} – излучаемый через проемы наружу тепловой поток, Вт; Q_c , Q_{w1} , Q_{w2} , Q_f – соответственно суммарные конвективные и лучистые тепловые потоки в стены ниже и внутри припотолочного слоя, в потолок и пол, Вт; γ – угол полураскрытия колонки, рад.

Рисунок 3.1 – Схема расчета тепломассообмена в помещении

Основные положения зонного моделирования обосновываются тем, что пожар развивается по следующему сценарию. Сначала происходит воспламенение горючих материалов. После этого газообразные продукты горения поднимаются вверх, что приводит к формированию конвективной струи, которая, достигнув перекрытия, растекается вдоль него. Образуется

нагретый задымленный припотолочный газовый слой, который начинает опускаться вниз с увеличением его толщины.

В дальнейшем ограничимся рассмотрением первой фазы начальной стадии пожара. Под понятием "первая фаза начальной стадии пожара" 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 [41].

При второй фазе нижняя граница II зоны расположена ниже верхнего края дверного проема. С наступлением второй фазы начинается процесс истечения нагретых газов из помещения через дверной проем. До наступления этой фазы имеет место лишь вытеснение (через дверной проем) холодного воздуха из III зоны.

Принимаем, что системы дымоудаления и приточной вентиляции не включены и в зоне припотолочного слоя нет открытых проемов. Положение нижней границы нагретого задымленного припотолочного слоя определяется из решения дифференциального уравнения (закон сохранения энергии в припотолочном слое) [41]:

$$\frac{dz_k}{d\tau} = -\frac{G_k}{\rho_o F_{\Pi}} - \frac{Q_{\text{пож}}(1-\varphi)}{c_p \rho_o T_o F_{\Pi}}, \quad (3.1)$$

где

$z_k(\text{м})$ – координата по высоте помещения нижней границы слоя;

$\tau(\text{с})$ – время;

$Q_{\text{пож}}(\text{Вт})$ – тепловая мощность, выделяющаяся в очаге горения;

$F_{\Pi}(\text{м}^2)$ – площадь потолка;

$G_k(\text{кг/с})$ – массовый расход продуктов горения и воздуха в конвективной колонке, который натекает в припотолочный слой;

$\varphi = (Q_{w1} + Q_{w2} + Q_c + Q_f + Q_{\text{пр}}) / Q_{\text{пож}}$ – коэффициент теплопотерь;

$T_o(\text{К})$ – начальная температура воздуха в помещении;

ρ_0 (кг/м³) – начальная плотность наружного воздуха в помещении;

c_p (Дж/(кг·К)) – удельная изобарная теплоемкость газа (принимается, что удельные изобарные теплоемкости воздуха и смеси продуктов горения и воздуха равны [41]).

Начальное условие (при $\tau = 0$) имеет вид: $z_k = h$; где h (м) – высота помещения.

Для численного решения уравнения (3.1) используется метод Рунге-Кутты (4-й порядок точности).

Величина среднеобъемной температуры припотолочного слоя и плотности смеси газов внутри слоя определяются из решения дифференциального уравнения (закон сохранения массы слоя) и уравнения состояния смеси идеальных газов [41]:

$$\frac{d(\rho_2 V_2)}{d\tau} = G_k, \quad (3.2)$$

$$p_2 \approx p_0 = \rho_2 R T_2, \quad (3.3)$$

где

V_2 (м³) – объем зоны припотолочного слоя;

T_2 (К) – среднеобъемная температура смеси газов внутри слоя;

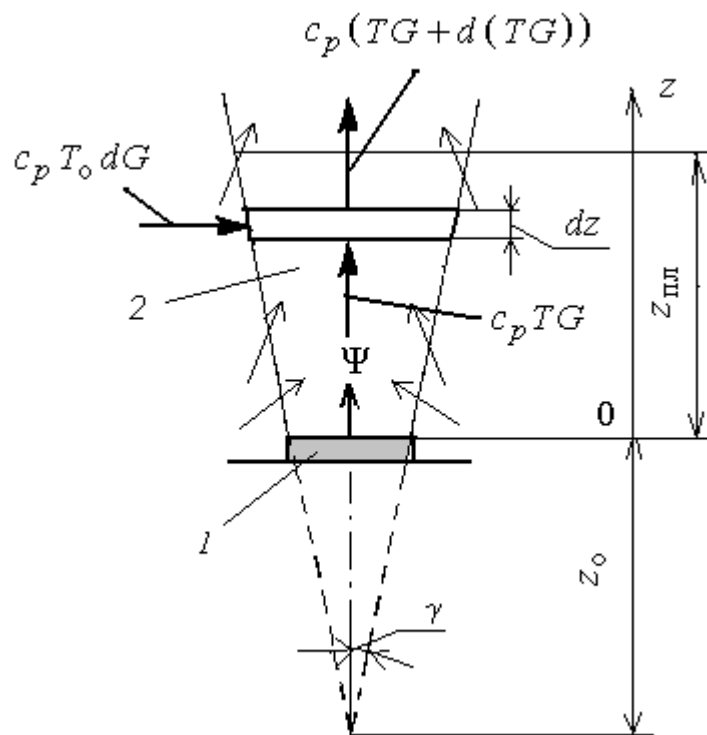
ρ_2 (кг/м³) – среднеобъемная плотность смеси газов внутри слоя;

p_2 (Па) – давление в слое;

p_0 (Па) – атмосферное давление на уровне пола;

R (Дж/(кг·К)) – газовая постоянная (принимается, что газовые постоянные воздуха и смеси продуктов горения и воздуха равны [41]).

Схема теплового баланса в элементарном объеме конвективной колонки представлена на рис. 3.2.



1 – горючее вещество; 2 – зона тепловыделения;

$T(K)$ – средняя температура газовой смеси в сечении колонки; $G(кг/с)$ – массовый расход смеси газов через поперечное сечение конвективной колонки на высоте z ; $z_{пл}(м)$ – высота зоны тепловыделения; $z_0 (м)$ – расстояние от поверхности горючего вещества до фиктивного (точечного) источника горения.

Рисунок 3.2 – Схема тепломассообмена в элементарном объеме конвективной колонки

Получим уравнение для расчета распределения массового расхода смеси продуктов газификации, горения и воздуха по высоте конвективной колонки с использованием уравнений законов сохранения энергии и импульса в «квазиодномерном» приближении.

Выделим элементарный объем высотой dz внутри колонки (рисунок 3.2). Допускаем, что тепловыделение распределено равномерно по всей высоте пламенной зоны. Тогда, согласно рис. 3.2, для смеси газов внутри вышеуказанного объема, уравнение закона сохранения энергии имеет вид:

$$c_p (G + dG)(T + dT) = c_p GT + c_p T_0 dG + \frac{Q_{пож}(1 - \chi)}{z_{пл}} dz, \quad (3.4)$$

где χ – доля от выделившейся в очаге горения тепловой мощности, приходящаяся на поступающий в ограждения тепловой поток из зоны конвективной колонки.

При этом при выводе уравнения (3.4) принимаем допущение о том, что тепловыделение внутри пламенной зоны происходит равномерно по ее высоте.

Уравнение закона сохранения импульса для газовой смеси и дыма, находящейся внутри контрольного объема высотой dz конвективной колонки, в соответствии с рис. 3.2 имеет вид:

$$\frac{d(\rho w_z^2)}{dz} = -\frac{dp}{dz} - \rho g, \quad (3.5)$$

где

w_z (м/с) – составляющая по вертикальной оси z средней скорости газовой смеси и дыма в поперечном сечении колонки;

z (м) – координата поперечного сечения колонки, отсчитываемая от поверхности горения;

ρ (кг/м³) – средняя плотность в поперечном сечении колонки;

g (м/с²) – ускорение свободного падения;

p (Па) – статическое давление в поперечном сечении колонки.

Уравнение (3.5) учитывает изменение расхода по высоте колонки в отличие от соответствующего уравнения в работах [62, 74].

Совместно интегрируя уравнения (3.4) и (3.5) по координате z (от $z=0$ до текущей координаты), получаем дифференциальное уравнение, из которого можно найти распределение массового расхода по высоте колонки:

$$\begin{aligned} C \frac{dG}{dz} = & \frac{2A \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{F^3(z)/\pi^3}} G^2 - \left[\frac{\pi}{F(z)} + \frac{2z \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{F^3(z)/\pi^3}} \right] \cdot \frac{A \cdot B \cdot G}{T_0} + \\ & + g \cdot \left[\rho_0 - \frac{p_0 G}{R \cdot (T_0 G + B \cdot z)} \right] \cdot F(z), \end{aligned} \quad (3.6)$$

где

$$A = \frac{T_0 R}{p_0 \pi} \text{ (м}^3\text{/кг)}; \quad B = \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{z_{\text{пл}} c_p} \text{ (кг}\cdot\text{К}/\text{(м}\cdot\text{с)}); \quad C = \frac{\pi(2G \cdot A + z \cdot A \cdot B/T_0)}{F(z)} \text{ (м/с)} -$$

размерные параметры;

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

p_0 (Па) – статическое давление в помещении перед пожаром на поверхности горючего материала ($z=0$).

Средняя температура по сечению колонки равна [41]:

$$T = T_0 + \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{c_p G}. \quad (3.7)$$

Величина угла полураскрытия конвективной колонки может зависеть как от высоты сечения колонки, так и от тепловой мощности, выделяющейся в очаге горения:

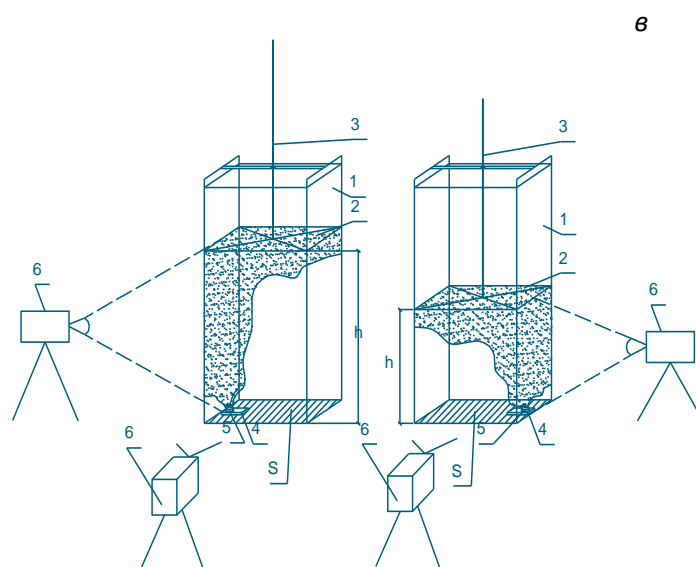
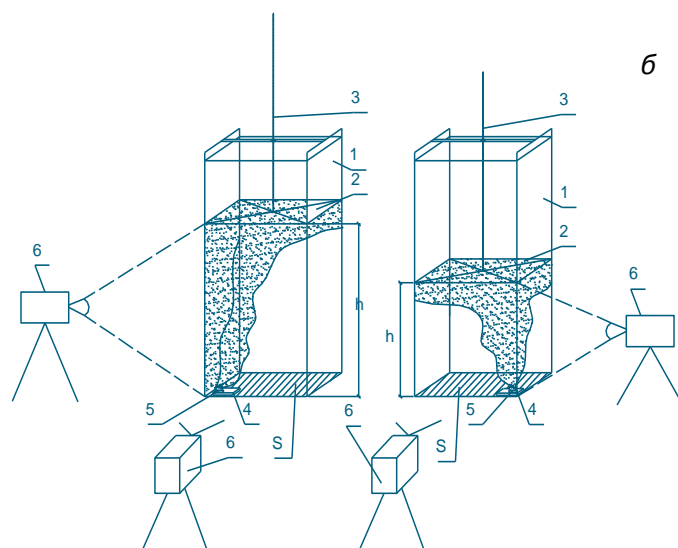
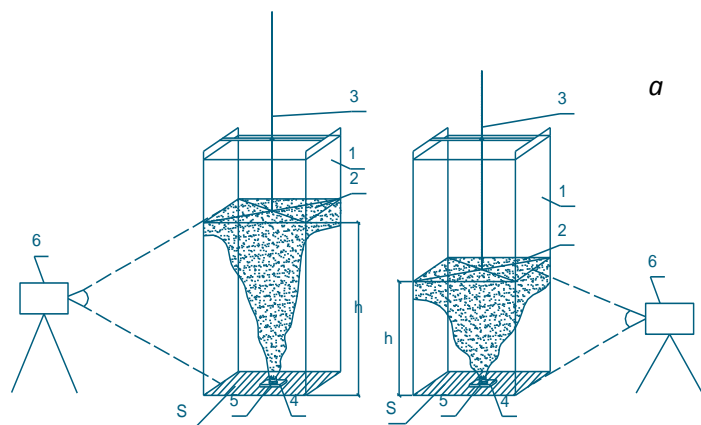
$$\gamma = f(z, Q_{\text{пож}}). \quad (3.8)$$

Таким образом, уравнения (3.6)-(3.8) позволяют учесть при расчете форму конвективной колонки.

3.3. Экспериментальные исследования процесса распространения дымовой завесы в макете помещения

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, представленном на рис. 3.3.

Стенки замкнутого (условно герметичного) прямоугольного экспериментального объема выполнены из прозрачного материала с произвольно регулируемым по высоте потолком, что позволяет проводить фотосъемку распространения продуктов горения по объему помещения.



1 – макет помещения из прозрачного материала; 2 – перемещающийся по вертикали потолок помещения; 3 – механизм перемещения; 4 – весы; 5 – горючий материал; 6 – фотокамера.

Рисунок 3.3–Общий вид экспериментальной установки с расположением горючего материала в центре (а), в углу (б) и у стены (в) пола помещения



Рисунок 3.4—Фото от начала горения до полного задымления макета помещения



Рисунок 3.5—Распространение дыма при расположении очага горения в углу

Процесс распространения дыма фиксировался с помощью стационарных фотокамер через равные промежутки времени 2 с от начала горения до полного задымления макета помещения (рисунок 3.4). 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 полураскрытия конвективной колонки γ (см. рис. 3.1);
- время опускания дыма до низа помещения;
- изменение массы горючего материала при сгорании.

Высоту потолка h принимали равной 1,5 и 1,0 м (рисунки 3.4, 3.5).

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 (рисунок 3.5).

Этот результат подтверждает данные численных экспериментов, выполненных в работах [69, 77] (см. рисунки 3.6, 3.7) с использованием полевой модели [69].

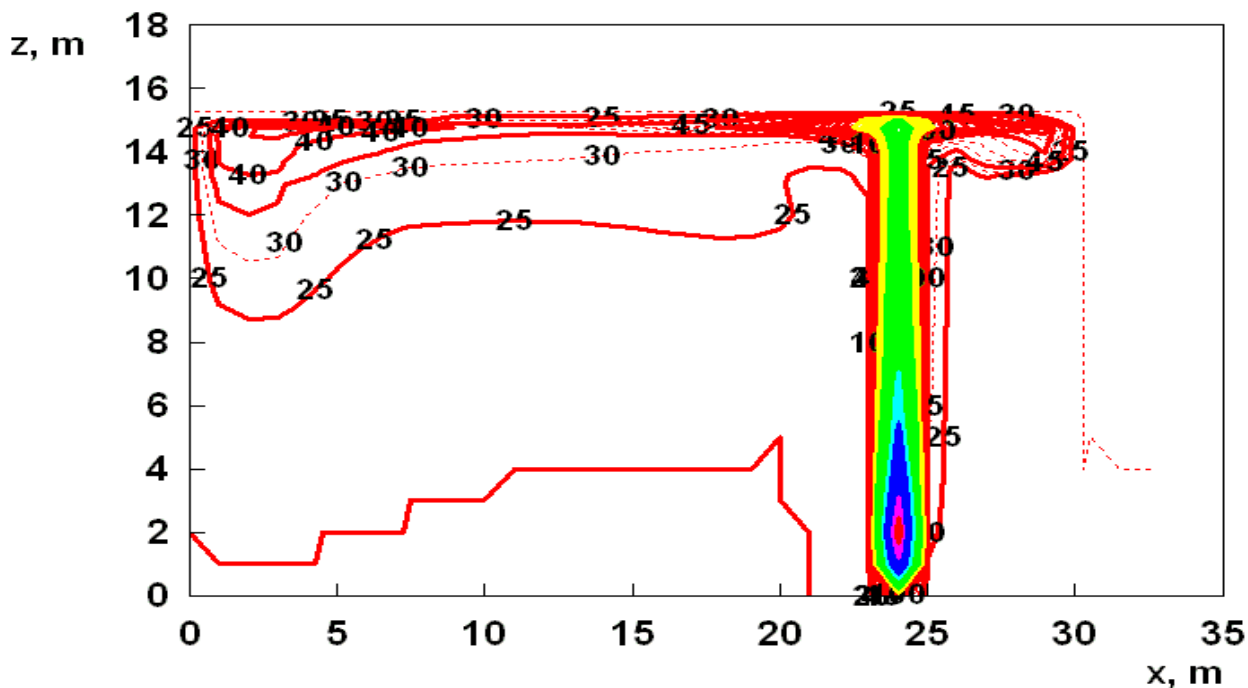


Рисунок 3.6 – Поля температур в продольном сечении модельного помещения, проходящем через его ось симметрии, при горении турбинного масла [77]

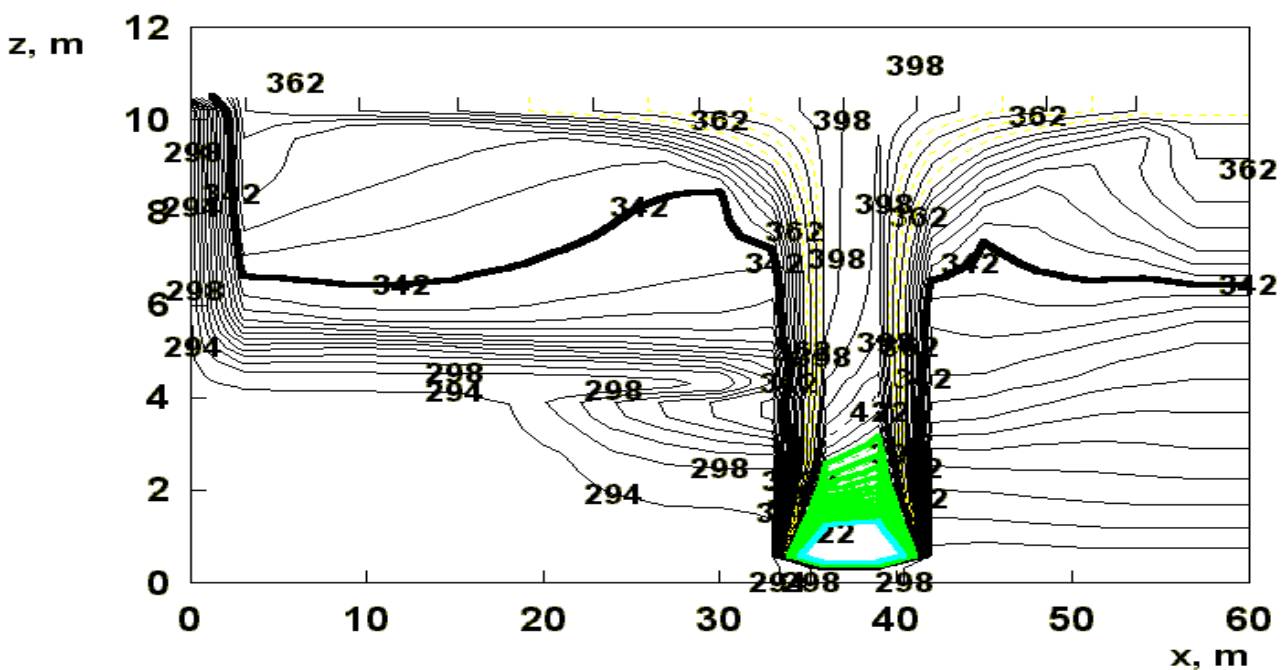


Рисунок 3.7 – Поля температур в продольном сечении модельного помещения, проходящем через его ось симметрии, при горении автомобиля [69]

На снимках (рисунки 3.8–3.10), иллюстрирующих течения в экспериментальном объеме на начальной стадии пожара, достаточно четко видно разделение областей объема помещения в соответствии с рис. 3.1. Условные границы конвективной колонки на рисунках 3.8–3.10 выделены прямыми линиями.



Рисунок 3.8 – Фото характерного распространения дыма внутри экспериментального объема при расположении горючего материала у стены ($h=1,5$ м)



$a - h = 1,5 \text{ м}; b - h = 1,0 \text{ м}$

Рисунок 3.9 – Фото характерного распространения дыма внутри экспериментального объема при расположении горючего материала в центре пола



$a - h = 1,5 \text{ м}; b - h = 1,0 \text{ м}$

Рисунок 3.10 – Фото характерного распространения дыма внутри экспериментального объема при расположении горючего материала в углу макета

Из рисунков 3.8–3.10 видно, что при любом из рассматриваемых местоположений горючего материала, граница конвективной колонки распространяется вверх приблизительно до середины высоты помещения сначала с постоянным углом полураскрытия, а затем этот угол резко изменяется к нулевому значению.

Таким образом, чтобы найти распределение массового расхода по высоте конвективной колонки из решения дифференциального уравнения (3.6), необходимо задать следующее условие:

$$\text{- при } z \leq z_k: \gamma = f(z, Q_{\text{пож}});$$

$$\text{- при } z > z_k: \gamma = 0;$$

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. [14].

Для более точного определения зависимости угла полураскрытия от высоты и мощности тепловыделения при пожаре необходимо тестировать решение уравнения (3.6) на экспериментальных данных по высоте пламенной зоны.

Пример такого подхода приведен в работе [73].

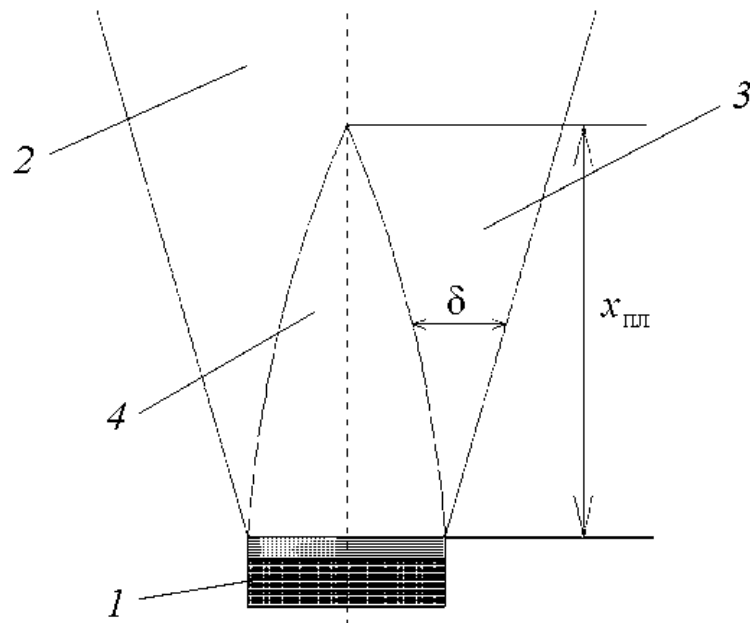
Схема пламенной зоны конвективной колонки, принятая в [73], представлена на рисунке 3.11.

В рассматриваемой работе угол γ определялся из сравнения расчетной величины высоты пламенной зоны с ее экспериментальными значениями при диффузионном горении жидкости, разлитой в поддоне.

Результаты численного эксперимента [73] аппроксимированы следующими зависимостями:

$$\text{- при } Q_{\text{пож}} < 1,0 \text{ МВт: } \gamma = 0;$$

- в диапазоне $1,0 \text{ МВт} \leq Q_{\text{пож}} < 10,0 \text{ МВт}$ (с достоверностью аппроксимации 0,992): $\gamma = 2,78 \cdot Q_{\text{пож}} - 2,78$.



1 – горючая жидкость; 2 – конвективная колонка; 3 – пограничный слой; 4 – пламенная зона

Рисунок 3.11 – Схема пламенной зоны

Для горения жидкостей можно использовать зависимости, предложенные в работе [127]:

$$z_{\text{пл}} = 0,235 \left(\frac{Q_{\text{пож}}}{1000} \right)^{2/5} - 2,04r, \quad (3.9)$$

$$z_{\text{пл}} = 84r \left(\frac{\psi}{\rho_o \sqrt{2gr}} \right)^{0,61}, \quad (3.10)$$

где $x_{\text{пл}}$ – высота пламенной зоны, м; r – эквивалентный радиус поверхности горючего материала, м; ψ – удельная скорость выгорания, кг/(с·м²).

3.4. Анализ экспериментальных результатов

Использование в качестве горючего вещества фенолформальдегидной смолы с наполнителем из древесной муки позволило получить четкую визуализацию границ конвективной колонки с окружающим воздухом.

Полученные экспериментальные данные подтверждают результаты теоретических исследований, представленных в работах [74, 75, 153] и кратко изложенных в п. 3.2. Например, из рисунка 3.12 [153] видно, что для

помещения размером $30 \times 24 \times 26,3$ м при тепловой мощности $Q_{\text{пож}} = 1,3$ МВт можно корректно использовать приближение свободноконвективной струи (кривые 1 и 2) только при $z < 0,4$, где $\bar{z} = z/h$ – относительная высота поперечного сечения колонки.

В связи с этим использование дифференциального уравнения (3.6) для расчета массового расхода через поперечное сечение колонки физически более обоснованно, чем применение аналогичных уравнений, основанных на закономерностях распространения неограниченной свободно-конвективной струи (в частности, в работах [41, 140, 150, 155, 161]).

Так, например, отношение \bar{G} расхода G_h (кг/с) на высоте потолка помещения к расходу G_c (кг/с) на высоте z_c (начиная с которой постоянный угол полураскрытия колонки начинает уменьшаться, стремясь к 0), которое определяется по формуле из работы [150]

$$G = 0,071(Q_{\text{пож}}(1-\chi)/1000)^{1/3} z^{5/3} + 1,8 \cdot 10^{-6} Q_{\text{пож}}(1-\chi),$$

составляет 1,97 при $z = 1,5$ м, $z_c = 1,0$ м, $\chi = 0,3$, $Q_{\text{пож}} = 0,001$ МВт или $Q_{\text{пож}} = 1,0$ МВт.

Из формулы (3.7) приращение температуры равно

$$T - T_0 = \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{c_p G},$$

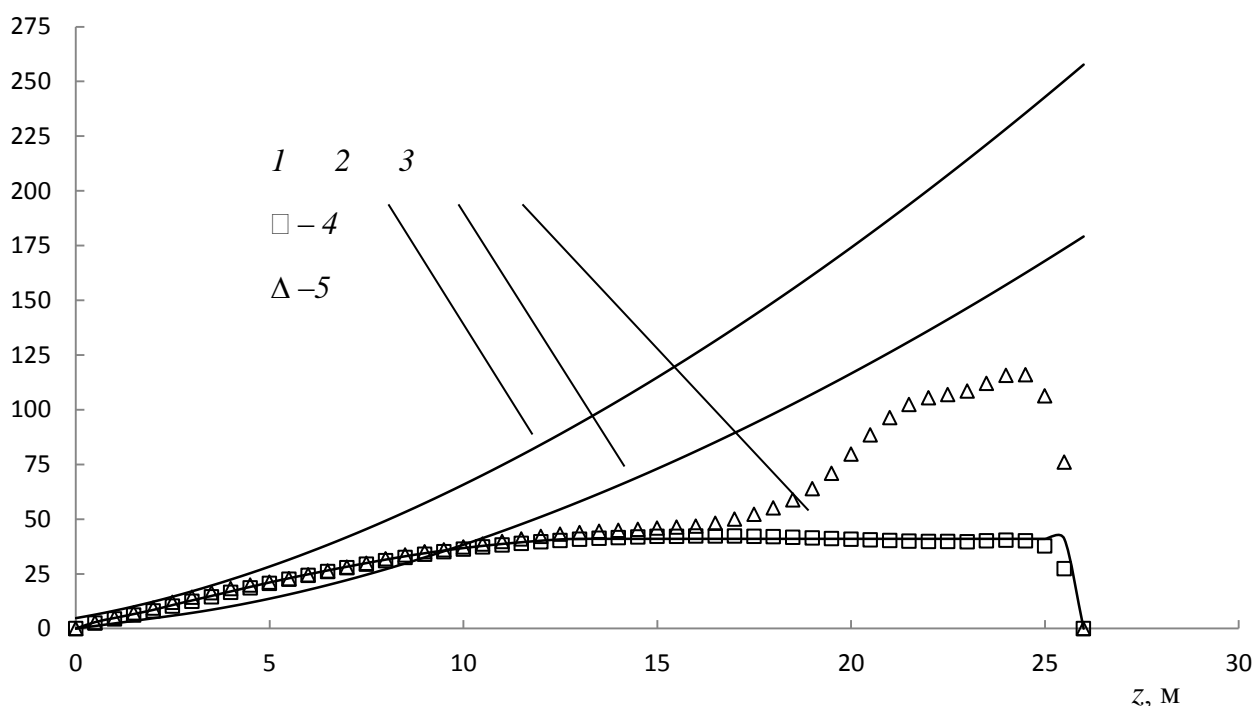
т.е. обратно пропорционально расходу G .

Это значит, что приращение средней по сечению конвективной колонки вблизи потолка температуры, рассчитанное по уравнению (3.7) с использованием формул для расхода G , взятых, например, из работ [41, 150, 155, 161], меньше результата, полученного из решения уравнения (3.6), примерно в 2 раза ($\bar{G} = 1,97$).

Следовательно, применение приближения свободноконвективной неограниченной струи при пожаре в помещении корректно в части колонки, которая расположена ниже половины высоты помещения, и приводит к существенному занижению температуры припотолочного слоя на начальной

стадии пожара, когда нижняя граница вышеуказанного слоя находится в верхней части помещения.

G , кг/с



Сплошные кривые: 1— по формуле из [41]; 2— по формуле из [151]; 3— по уравнению (3.6).

Численный эксперимент с использованием трехмерной полевой модели[69]: 4— по высоте колонки; 5— во всем поперечном сечении помещения.

Рисунок 3.12 – Зависимости массовых расходов смеси газов от высоты атриума, рассчитанные по аналитическим формулам и при численном эксперименте с использованием трехмерной полевой модели

Неучет формы колонки, например, при расчете системы дымоудаления 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 (в 2 раза в примере работы [78]) уменьшается. В связи с этим известные формулы для расчета массовых расходов газовой смеси вдоль вертикальной оси колонки, приведенные, в частности, в работах [41, 140, 150, 155, 161], требуют корректировки.

Формы конвективной колонки, используемые в существующих методах расчета, приведены на рисунках 3.13-3.15. Из рисунков видно, что во всех рассмотренных зонных методах расчета конвективная колонка имеет форму правильного конуса с постоянным углом полураскрытия практически до перекрытия помещения.

При дальнейших исследованиях планируется изучить влияние различных технических решений приточно-вытяжной и противодымной систем вентиляции на термогазодинамическую картину пожара в предложенной экспериментальной установке.

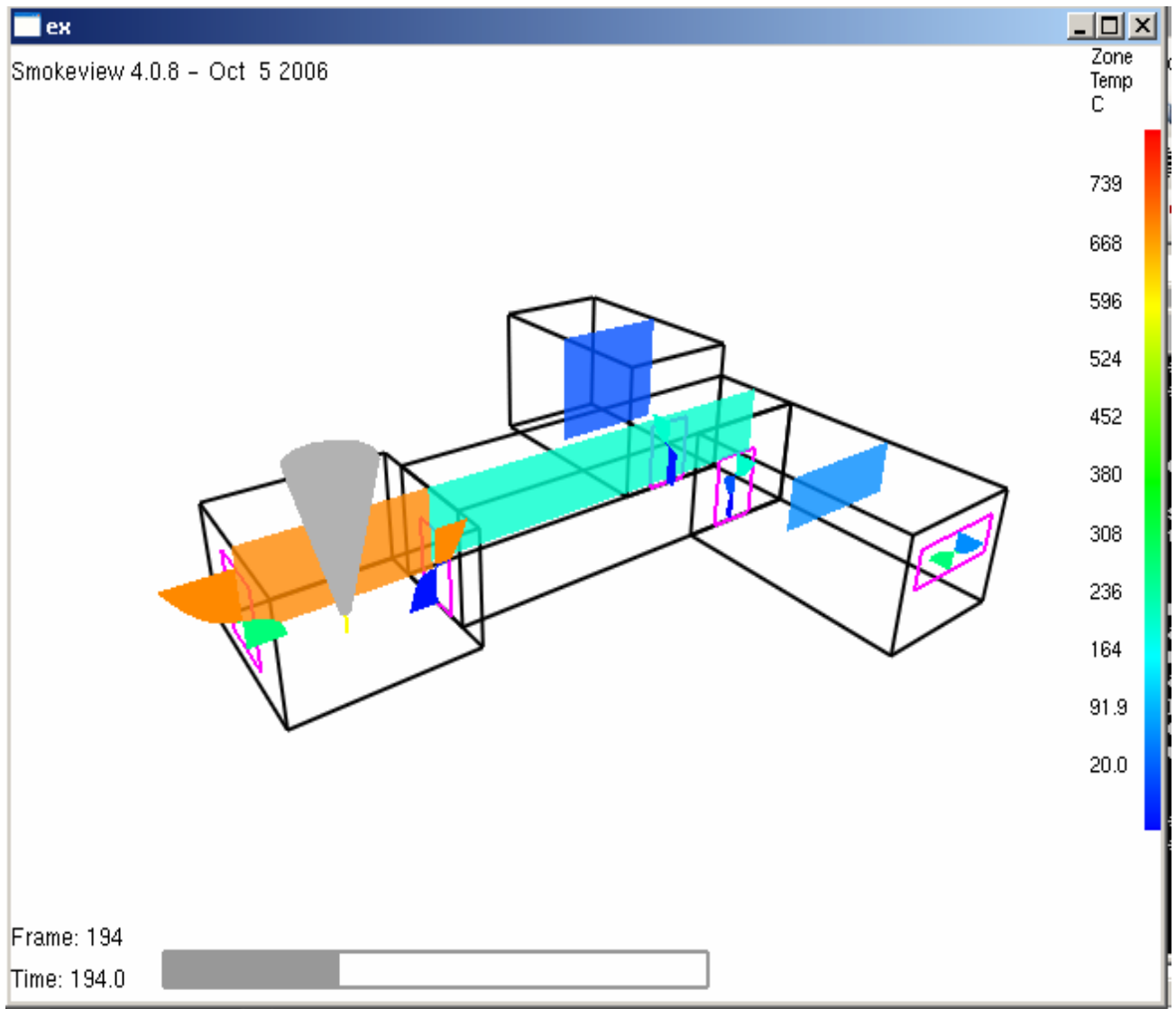


Рисунок 3.14 – Форма конвективной колонки по работе [25]

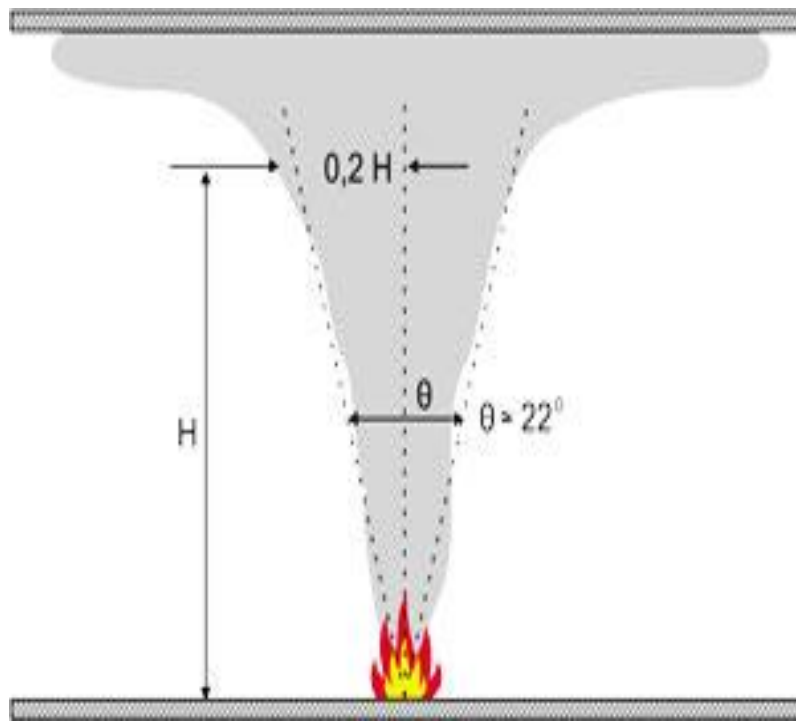


Рисунок 3.13 – Форма конвективной колонки по работе [149]

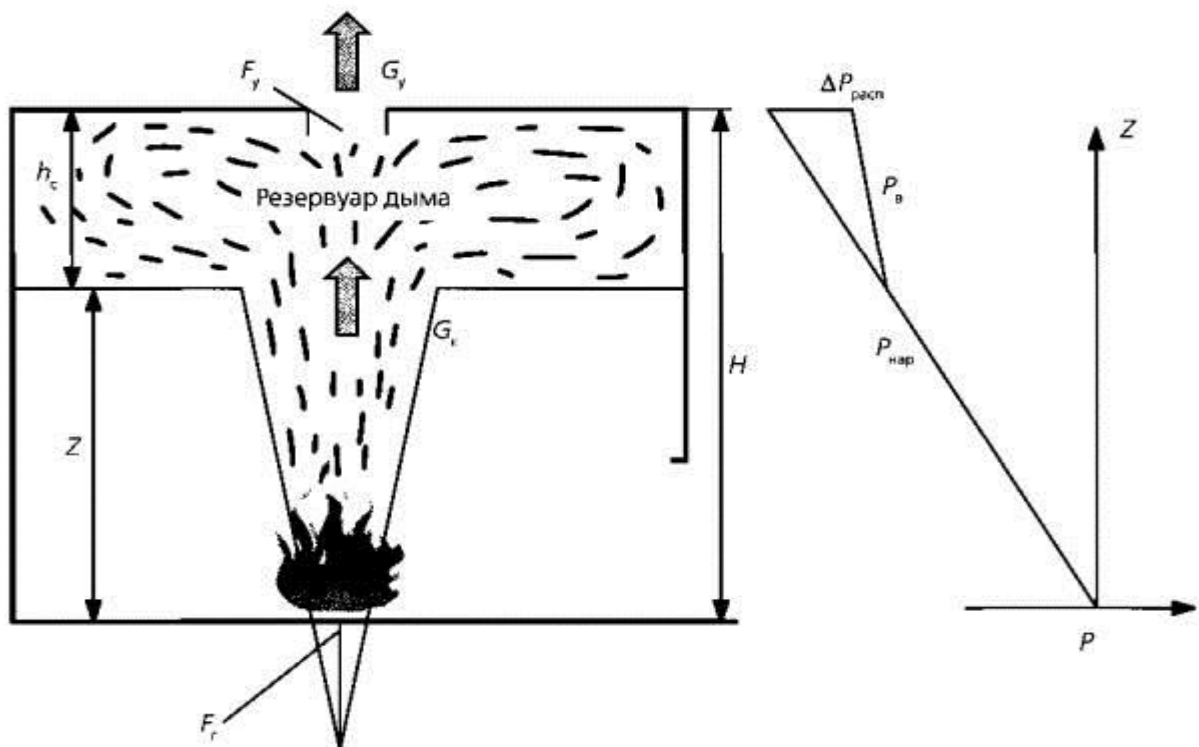


Рисунок 3.15 – Форма конвективной колонки по работе [112]

3.5. Выводы по третьей главе

1. Предложенная модификация зонной модели для определения динамики ОФП в помещении учитывает характеристики формы конвективной колонки (угол полураскрытия). В традиционном подходе угол $\gamma = \text{const}$ по высоте.

2. Разработанная экспериментальная мелкомасштабная установка позволяет исследовать форму конвективной колонки с учетом расположения горючего материала относительно стен экспериментального объема с регулируемой высотой его перекрытия. Результаты проведенных экспериментов подтвердили теоретические исследования [69] с использованием трехмерной полевой модели по особенностям распространения продуктов горения внутри помещений.

3. Эксперименты показали, что форма конвективной колонки в помещении существенно отличается от соответствующей формы свободно-конвективной струи в неограниченном пространстве. До определенной высоты угол полураскрытия колонки остается приблизительно постоянным, а затем резко переходит к нулевому значению.

4. Принятие условия $\gamma = \text{const}$ по высоте помещения при традиционном подходе приводит к недооценке повышения температуры в припотолочном газовом слое. В рассмотренном примере учет распределения величины угла полураскрытия колонки по высоте помещения привел к увеличению среднеобъемной температуры припотолочного слоя в 2 раза по сравнению с расчетами, выполненными с использованием традиционного подхода.

ГЛАВА 4. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ ПО ИНТЕГРАЛЬНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

4.1. Опасные факторы пожара

Как известно, при возникновении пожара в бытовых, административных, промышленных помещениях опасными факторами помимо непосредственно пламени являются дым, повышение температуры окружающей среды, понижение в процессе горения концентрации кислорода и выделение при этом токсичных продуктов горения. В зависимости от условий протекания пожара определяющими могут быть те или иные факторы, но на человека при пожаре одновременно воздействуют все опасные факторы. В ходе медико-биологических исследований получены предельно допустимые значения опасных факторов пожара (ОФП), представленные, например, в ГОСТ 12.1.004-91. Так, для температуры это предельное значение составляет 70⁰С. Для кислорода нормальная концентрация в воздухе составляет 226 г/м³ (около 23%). При уменьшении его нормальной концентрации вдвое нарушается деятельность сердечно-сосудистой и легочной систем человека, а при уменьшении концентрации кислорода в 3 раза останавливается дыхание и сердце прекращает работу. Для каждого из токсичных продуктов горения установлены свои предельно допустимые значения концентрации в воздухе. Так, для диоксида углерода это значение составляет 110 г/м³, а для оксида углерода – 1,16 г/м³. Критическое значение для оптической плотности дыма определяется из равенства

$$\mu_{кр} = 2,38/l_{кр}, \quad (4.1)$$

где μ (Нп/м) – оптическая плотность дыма, Нп – сокращенное Непер;

$l_{кр}$ (м) – критическая дальность видимости.

При подготовке рекомендаций, обеспечивающих безопасную эвакуацию людей при пожаре, необходимо определить время достижения опасных факторов своих предельно допустимых значений. При возникновении очага возгорания, не сопровождающегося взрывом, в бытовых, административных, лечебно-профилактических, спортивных, культурно-массовых помещениях массовая эвакуация людей проводится на начальной стадии развития пожара. В течение этой стадии не происходит резкого изменения таких опасных для организма человека факторов, как температура, концентраций токсичных газов и кислорода, особенно в помещениях, смежных с тем, где непосредственно находится очаг возгорания. При этом время эффективной эвакуации людей будет определяться временем достижения критической плотности дыма в помещениях, из которых проводится эвакуация, так как этот фактор оказывает наибольшее психологическое воздействие на человека вплоть до паники, а на физическом уровне значительно затрудняет ориентацию при определении путей эвакуации из здания.

4.2. Упрощение дифференциальных уравнений интегральной математической модели в начальной стадии пожара

Определяющие уравнения математической модели пожара описывают механизм взаимодействия процессов, присущих пожару: тепловыделение в результате горения, образование дыма в пламенной зоне с изменением оптической проницаемости газовой среды, уменьшение содержания кислорода в помещении, образование и распространение токсичных газов, теплообмен и нагревание ограждающих конструкций, газообмен помещения с очагом возгорания и смежных с ним.

Детальное изучение характера изменения параметров газовой среды и протекания процесса горения имеет значение в помещении, в котором непосредственно находится очаг возгорания. Рассматривая вопрос о 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. Интегральная модель пожара разработана в середине 70-х годов профессором Ю.А. Кошмаровым [42] и получила дальнейшее развитие в работах В.М. Астапенко, И.Д. Гуско, С.И. Зернова, Ю.С. Зотова, В.С. Козлова, М.Ю. Кошмарова, А.В. Матюшина, С.В. Пузача, А.Н. Шевлякова и др. Как отдельный вид можно рассматривать интегральную модель для начальной стадии пожара [45]. Актуальность исследования начальной стадии пожара обусловлена проблемой обеспечения безопасной эвакуации людей из помещения.

Интегральный подход к описанию состояния среды позволяет не рассматривать отдельные неоднородные поля с отличающимися термодинамическими параметрами состояния, при этом состояние газовой среды описывается в самом общем виде. В интегральной модели пожара рассматривается изменение с течением времени средних (интегральных) значений параметров состояния среды в помещении, таких, как: p_m – среднеобъемное давление ($\text{Н}\cdot\text{м}^2$); T_m – среднemasсовая температура (К); среднеобъемные плотности ($\text{кг}/\text{м}^3$) ρ_m – газовой среды в целом, $\rho_m^{O_2}$ – кислорода, $\rho_m^{m.z.}$ – токсичных газов; μ_m – среднеобъемная оптическая плотность дыма ($\text{Нп}/\text{м}$). Интегральная модель пожара позволяет получить эти средние значения параметров состояния среды в помещении в произвольный момент времени развития пожара.

С формальных позиций среднеобъемное давление – это осреднение всех значений локальных давлений в объеме помещения

$$p_m = \frac{1}{V} \int_{(V)} p dV .$$

Аналогично среднеобъемная плотность газовой среды в целом представляет собой осреднение всех значений локальной плотности в объеме помещения

$$\rho_m = \frac{1}{V} \int_{(V)} \rho dV.$$

Среднеобъемную плотность можно также представить как отношение массы M всего газа, заполняющего помещение, к его объему V

$$\rho_m = \frac{M}{V}.$$

При этом среднеобъемные плотности кислорода и токсичных газов

$$\rho_m^{O_2} = \frac{M^{O_2}}{V}, \quad \rho_m^{m.z.} = \frac{M^{m.z.}}{V},$$

где M^{O_2} , $M^{m.z.}$ – массы кислорода и токсичных газов соответственно, находящихся в данном помещении объема V .

Среднемассовую температуру можно выразить из уравнения усредненного состояния газовой среды $p_m = \rho_m R T_m$, совпадающего по виду с уравнением Клайперона для локальных параметров состояния $p = \rho R T$, где R – газовая постоянная. В результате получим

$$T_m = \frac{p_m}{\rho_m R}.$$

Подставляя в последнее равенство интегральное представление средней плотности, приходим к равенству

$$T_m = \frac{p_m}{\frac{1}{V} \int_{(V)} \rho R dV} = \frac{1}{\frac{1}{V} \int_{(V)} \frac{p}{p_m T} dV}.$$

С учетом того, что $p \approx p_m$, окончательно получим

$$T_m = \frac{V}{\int_{(V)} \frac{1}{T} dV}.$$

Последнее равенство позволяет вычислять среднемассовую температуру в натурном эксперименте, если известно распределение локальных температур в достаточно большом количестве точек по всему объему помещения.

По аналогии с интегральными равенствами для среднеобъемного давления и среднеобъемной плотности можно ввести понятие среднеобъемной температуры газовой среды, определяемой равенством

$$T_m^V = \frac{1}{V} \int_{(V)} T dV.$$

При однородном температурном поле среднеобъемная и среднемассовая температуры равны друг другу. Чем больше неоднородность температурного поля, тем больше их различие. В реальных пожарах среднеобъемная температура всегда несколько выше среднемассовой, их относительная разность, как правило, не превышает 5-6%.

Среднеобъемная оптическая плотность дыма представляет собой произведение средней концентрации твердых частиц на объем помещения (число частиц, приходящихся на единицу объема) N (Нп/м³) и эффективного сечения экстинкции частиц χ (м²)

$$\mu_m = N\chi.$$

Чем выше оптическая плотность дыма, тем хуже видимость в помещении. При этом дальность видимости связана с концентрацией дыма следующим приближенным соотношением

$$l_{вид} \cong 2,38 / \mu_m.$$

Дифференциальные уравнения интегральной математической модели пожара в общем виде представлены в п. **2.1**. При рассмотрении начальной стадии пожара разрешающую систему примем в виде шести обыкновенных дифференциальных уравнений пожара, которые предложены в работах профессора Кошмарова Ю.А. [41, 45].

Первое уравнение вытекает из закона сохранения массы для газовой среды: в данной термодинамической системе изменение массы газовой среды в

помещении за единицу времени равно алгебраической сумме масс поступающих и уходящих потоков. Уравнение материального баланса для газовой среды в помещении записывается в виде:

$$\frac{d(\rho_m V)}{d\tau} = \psi + G_a - G_m, \quad (4.2)$$

где $V(\text{м}^3)$ – объем помещения;

$\rho_m V(\text{кг})$ – масса газа, заполняющего данный объем;

ψ (кг/с) – скорость выгорания (количество горючего материала, сгорающего в единицу времени);

G_a, G_m (кг/с) – массовые расходы поступающего извне воздуха и исходящих наружу газов в рассматриваемый момент времени соответственно при естественном газообменном процессе.

Второе уравнение – уравнение энергии пожара, которое выводится на основе первого закона термодинамики. При этом предполагается, что термодинамическая система не совершает работы расширения. Кинетическая энергия движения газовой среды в помещении мала по сравнению с ее потенциальной энергией. Удельная кинетическая энергия газа при прохождении потоков через проемы пренебрежимо мала по сравнению с удельной энтальпией. С учетом этого получаем уравнение

$$\frac{1}{k_m - 1} \frac{d(p_m V)}{d\tau} = \eta Q_n^p \psi + i_3 \psi + c_{pa} T_a G_a - c_{pm} a_T T_m G_m - Q_{o.k.}, \quad (4.3)$$

где

k_m – среднеобъемный показатель адиабаты газовой среды помещения (отношение изобарной и изохорной теплоемкостей идеального газа: $k_m = c_p/c_v$);

Q_n^p (Дж/кг) – низшая рабочая теплота сгорания горючего материала;

i_3 (Дж/кг) – энтальпия продуктов газификации (пиролиз, испарение) горючего материала;

c_{pa}, c_{pm} (Дж/кг·К) – удельные изобарные теплоемкости для воздушной и возникающей при горении газовой среды соответственно;

T_a (К) – температура воздуха снаружи;

a_T – коэффициент, с помощью которого учитывается различие среднemasсовой температуры выталкиваемых газов от среднеобъемной температуры газовой среды в целом;

$Q_{o.k.}$ (Дж/с) – тепловой поток, поглощаемый ограждающими конструкциями и излучаемый через проемы.

Выражение в левой части уравнения (4.3) представляет собой скорость изменения тепловой энергии смеси газов в помещении в течение малого промежутка времени $d\tau$

$$\frac{1}{k_m - 1} \frac{d(p_m V)}{d\tau} = \frac{dU}{d\tau}.$$

Первое слагаемое в правой части уравнения (4.3) определяет скорость тепловыделения, то есть то количество тепла, которое поступает в газовую среду в процессе горения за единицу времени. Второе слагаемое определяет поток энергии, поступающий в помещение вместе с продуктами газификации горящего материала. Третье слагаемое суммирует внутреннюю тепловую энергию поступающего в единицу времени воздуха и работу проталкивания, которую совершает внешняя атмосфера. Четвертый член правой части уравнения (4.3) определяет совокупность внутренней тепловой энергии, уносимой в единицу времени уходящими газами, и работы выталкивания, которую совершает рассматриваемая термодинамическая система.

Дифференциальные уравнения баланса оптического количества дыма, баланса массы кислорода и баланса токсичных продуктов горения записываются аналогично уравнению (4.2).

Уравнение баланса оптического количества дыма:

$$\frac{d(\mu_m V)}{d\tau} = D\psi - \frac{\mu_m k_d}{\rho_m} G_m - k_c S_{o.k.}, \quad (4.4)$$

где

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

$D\psi$ (Нп·м²/с) – оптическое количество дыма;

k_d – коэффициент, учитывающий отличие оптической концентрации дыма в уходящих газах от μ_m ;

k_c (Нп/с) – коэффициент седиментации, который учитывает осаждение частиц дыма на ограждающие конструкции;

$S_{o.k.}$ (m^2) – площадь поверхности ограждающих элементов помещения (стен, потолка, пола).

Уравнение баланса массы кислорода:

$$\frac{d(\rho_m^{O_2} V)}{d\tau} = \frac{\rho^{O_2}}{\rho} G_a - k_{O_2} \frac{\rho_m^{O_2}}{\rho_m} G_m - L_{O_2} \psi \eta, \quad (4.5)$$

где отношения ρ^{O_2} / ρ и $\rho_m^{O_2} / \rho_m$ представляют собой средние массовые доли кислорода в поступающем воздухе и в помещении соответственно;

k_{O_2} – коэффициент, учитывающий отличие содержание кислорода в вытесняемых газах от среднеобъемной концентрации кислорода $\rho_m^{O_2}$;

L_{O_2} (кг/кг) – потребление кислорода (количество кислорода, которое необходимо для обеспечения полного сгорания единицы массы горючего материала);

η – коэффициент полноты сгорания.

Уравнение баланса токсического продукта горения:

$$\frac{d(\rho_m^{m.z.} V)}{d\tau} = L_{m.z.} \psi \eta - k_{m.z.} \frac{\rho_m^{m.z.}}{\rho_m} G_m, \quad (4.6)$$

где

$L_{m.z.}$ (кг/кг) – количество выделяемых токсичных газов при сгорании единицы массы горючего материала;

$k_{m.z.}$ – коэффициент, учитывающий отличие концентрации токсичных продуктов горения в уходящих газах от среднеобъемной концентрации токсичных газов $\rho_m^{m.z.}$;

отношение $\rho_m^{m.z.} / \rho_m$ определяет среднюю массовую долю токсичного газа в помещении.

Система пяти дифференциальных уравнений (4.2) – (4.6) относительно шести неизвестных функций $\rho_m(\tau)$, $p_m(\tau)$, $T_m(\tau)$, $\mu_m(\tau)$, $\rho_m^{O_2}(\tau)$, $\rho_m^{m.z.}(\tau)$ замыкается алгебраическим усредненным уравнением состояния газовой среды в помещении

$$p_m = \rho_m RT_m, \quad (4.7)$$

где R (Дж/кг·К) – газовая постоянная. Это уравнение связывает между собой три усредненных параметра состояния газовой среды так же, как связывает уравнение Клайперона локальные значения основных термодинамических параметров состояния: давление, плотность, температуру.

Константы интегрирования дифференциальных уравнений (4.2) – (4.6) определяются начальными условиями до развития пожара в помещении:

$$\rho_m(0) = \rho_0, \quad p_m(0) = p_0, \quad \mu_m(0) = 0, \quad \rho_m^{O_2}(0) = \rho_0^{O_2}, \quad \rho_m^{m.z.}(0) = 0. \quad (4.8)$$

Входящие в уравнения (4.2) – (4.7) такие параметры, как объем V помещения, площадь $S_{o.k.}$ ограждающих элементов, теплота сгорания Q_H^P горючего материала, его дымообразующая способность D , стехиометрические коэффициенты L_{O_2} , $L_{m.z.}$, энтальпия продуктов газификации i_s , являются однозначно определенными физическими величинами. Значения теплоты сгорания Q_H^P зависят от природы горючих материалов, например, для дерева $Q_H^P = 13,8 \cdot 10^6$ Дж/кг, для бензина $Q_H^P = 41,8 \cdot 10^6$ Дж/кг. Дымообразующая способность горючего материала есть оптическое количество дыма, образующегося при сгорании единицы массы горючего материала: $D = n\chi$, где n (Нп/кг) – количество частиц, образующихся при сгорании единицы массы горючего материала, χ (м²) – эффективное сечение экстинкции частиц.

Ряд величин, входящих в те же уравнения, зависят от параметров состояния среды в помещении. Сюда относятся: массовые расходы входящего воздуха G_a и выходящих из помещения газов G_m ; скорость выгорания ψ ; коэффициент η полноты сгорания; поглощаемый ограждающими конструкциями и излучаемый наружу тепловой поток $Q_{o.k.}$.

Расходы уходящих газов и поступающего воздуха при пожаре определяются значениями среднеобъемных параметров состояния газовой среды в помещении и геометрическими размерами проемов. Так как параметры состояния среды в помещении изменяются, то будут переменными во времени расходы поступающего воздуха и уходящих газов. Кроме того, в определенные моменты времени могут вскрываться дополнительные проемы, которые в начале пожара были закрыты. Например, при температуре 300 – 400 °С разрушается остекление оконных блоков.

Скорость выгорания ψ обозначает расход горючих газов, которые образуются в результате термического разложения или испарения с поверхности горючих материалов. Скорость выгорания на единицу поверхности воспламенившихся твердых и жидких горючих материалов называется удельной массовой скоростью выгорания – $\psi_{уд}$ (кг/с·м²). Очевидно, что $\psi = \psi_{уд} \cdot S_{зм}$, где $S_{зм}$ – площадь поверхности горючих материалов, охваченных пламенем. В процессе испарения и пиролиза происходит поглощение тепловой энергии. Количественной мерой этого процесса являются теплота испарения и теплота газификации (пиролиза), значения которых различны для разных веществ. Следовательно, $\psi_{уд}$ зависит от природы твердых и жидких горючих материалов.

По характеру горения твердые горючие материалы можно условно разделить на две группы. В первую группу входят такие материалы, горение которых протекает только в газовой фазе, при этом поверхностный слой плавится или сублимируется и испаряется. К этой группе относится большинство синтетических полимерных материалов. Во вторую группу входят материалы, при горении которых происходит термическое разложение с выделением газообразных продуктов и образованием обугленного поверхностного слоя, который увеличивается по толщине в процессе горения. Характерным представителем таких материалов является древесина или фенольные полимерные материалы. При развитии пожара в помещении в

течение достаточно большого интервала времени в горении участвуют в основном летучие продукты термического разложения.

В процессе термического разложения происходит уменьшение массы твердого горючего материала, которое в расчете на единицу времени характеризует скорость выгорания. Для твердых материалов скорость выгорания зависит как от физической природы горючего материала, так и от пространственного расположения пожарной нагрузки, отдельные предметы и детали которой могут иметь сложную конфигурацию. Например, древесина может быть представлена в виде бревен, досок или в виде готовых столярных изделий (мебель, полки, двери, оконные блоки и т.д.). Если та же древесина находится в штабелях, то при выгорании верхнего слоя будет наблюдаться снижение скорости выгорания, так как на поверхности горящего штабеля накапливается обугленный пористый слой и зольные остатки, препятствующие свободному поступлению необходимого для процесса горения кислорода к нижним слоям древесины. Снижение скорости выгорания будет иметь место и при горении синтетических полимерных материалов, например, оргстекла, в виде различных обрезков (отходов производства), так как при размягчении и плавлении в процессе горения меняется макроструктура слоя, а, следовательно, и поверхность испарения.

Массовая скорость выгорания ψ зависит от режимов выгорания горючих материалов. При этом обычно рассматривают два предельных режима горения горючей нагрузки [4]. Первый режим называют пожаром, регулируемым нагрузкой (ПРН), при котором имеется достаточное количество кислорода для выгорания горючих материалов. В этом случае горение материалов в помещении происходит аналогично их горению на открытом воздухе. Второй – пожаром, регулируемым вентиляцией (ПРВ), при котором скорость тепловыделения лимитируется количеством поступающего извне кислорода. Между ними имеют место промежуточные режимы, в процессе развития пожара режимы выгорания могут последовательно менять друг друга.

Скорость, с которой выгорает материал, в определенной степени зависит и от температуры смеси газов в помещении.

В работе [44] предложена математическая модель, описывающая процесс выгорания твердых материалов с учетом зависимости скорости выгорания от большинства перечисленных выше факторов.

Значение η вычисляют по эмпирическим формулам, полученным в результате экспериментальных исследований пожаров в помещениях. При этом η , как и ψ , определяется режимом выгорания горючих материалов, так как прежде всего зависит от концентрации кислорода в газовой среде помещения.

Эмпирические и полуэмпирические методы расчета тепловых потоков в ограждающие конструкции основаны на результатах экспериментальных исследований. Для вычисления значений, зависящих от параметров состояния среды, в ряде случаев необходимо привлечение дополнительных уравнений из теорий горения, газообмена между смежными помещениями, конвективного и лучистого теплообмена.

Массовая эвакуация людей при пожаре происходит в его начальной стадии. В этот период в помещениях с относительно небольшим количеством проемов газообмен происходит, как правило, в одном направлении, из окружающей среды поступление воздуха практически отсутствует. Следовательно, в представленных выше дифференциальных уравнениях пожара можно положить $G_a = 0$. В жилых, бытовых, административных, лечебно-профилактических, спортивных, культурно-массовых помещениях из-за наличия проемов среднее давление среды практически не меняется и равно давлению наружного воздуха. Тогда, из формулы (4.7)

$$\rho_m T_m = \rho_0 T_0 = const; dp_m / d\tau = 0.$$

Здесь ρ_0, T_0 – плотность и температура среды до начала пожара.

Кроме того, в начальной стадии пожара средняя температура и концентрация кислорода в помещении изменяются незначительно. Следовательно, коэффициент полноты сгорания η и дымообразующую способность горючего материала D в этот период можно считать постоянными.

Объем помещения, охваченного пожаром, $V = const$; коэффициенты $k_{\delta} = 1$, $k_{O_2} = 1$, $k_{m.z.} = 1$, $a_T = 1$.

С учетом изложенных выше допущений уравнения пожара (4.2) – (4.6) принимают вид:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \psi - G_m, \quad (4.9)$$

$$\eta Q_H^p \psi + i_3 \psi - c_{pm} T_m G_m - Q_{o.k.} = 0, \quad (4.10)$$

$$V \frac{d\mu_m}{d\tau} = D\psi - \frac{\mu_m}{\rho_m} G_m - k_c S_{o.k.}, \quad (4.11)$$

$$V \frac{d\rho_m^{O_2}}{d\tau} = -\frac{\rho_m^{O_2}}{\rho_m} G_m - L_{O_2} \psi \eta, \quad (4.12)$$

$$V \frac{d\rho_m^{m.z.}}{d\tau} = L_{m.z.} \psi \eta - \frac{\rho_m^{m.z.}}{\rho_m} G_m. \quad (4.13)$$

Полученное в результате упрощений алгебраическое уравнение энергии пожара (4.10) позволяет вывести формулу расхода выходящих из помещения газов в рассматриваемый момент времени. При этом в течение промежутка времени, отвечающему начальной стадии пожара, можно принять, что отношение теплового потока, поглощаемого ограждающими конструкциями и излучаемого через проемы, к тепловыделению в процессе горения есть величина постоянная

$$\frac{Q_{o.k.}}{\eta Q_H^p \psi} = \varphi = const.$$

В соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 величина φ называется коэффициентом теплопотерь. Тогда уравнение (4.10) запишется в виде:

$$\eta Q_H^p \psi (1 - \varphi) + i_3 \psi - c_{pm} T_m G_m = 0.$$

Отсюда получаем выражение для секундного расхода выталкиваемых при горении газов:

$$G_m = \frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi) + i_3 \psi}{c_{pm} T_m} \psi. \quad (4.14)$$

С учетом принятого выше условия $\rho_m T_m = \rho_0 T_0$ равенство (4.14) можно представить в виде:

$$G_m = \frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi) + i_3}{c_{pm} \rho_0 T_0} \psi \rho_m. \quad (4.15)$$

С учетом (4.15) уравнения (4.9), (4.11) – (4.13) принимают вид:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \psi \left[1 - \frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi) + i_3}{c_{pm} \rho_0 T_0} \rho_m \right], \quad (4.16)$$

$$V \frac{d\mu_m}{d\tau} = \psi \left[D - \frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi) + i_3}{c_{pm} \rho_0 T_0} \mu_m \right] - k_c S_{o.k.}, \quad (4.17)$$

$$V \frac{d\rho_m^{O_2}}{d\tau} = -\psi \eta \left[L_{O_2} + \frac{Q_H^p (1 - \varphi) + i_3}{c_{pm} \rho_0 T_0} \rho_m^{O_2} \right], \quad (4.18)$$

$$V \frac{d\rho_m^{m.z.}}{d\tau} = \psi \eta \left[L_{m.z.} - \frac{Q_H^p (1 - \varphi) + i_3}{c_{pm} \rho_0 T_0} \rho_m^{m.z.} \right]. \quad (4.19)$$

Система полученных в результате дифференциальных уравнений не является связанной, решение каждого из них можно искать отдельно.

Входящая в правые части уравнений (4.15) – (4.19) функция ψ имеет различный вид в зависимости от того, как распространяется пожар [41]. Если пожар распространяется по поверхности твердых горючих материалов по кругу, то

$$\psi = \pi \psi_{y\partial} v_l^2 \tau^2, \quad (4.20)$$

где

$\psi_{y\partial}$ (кг/м²·с) – массовая удельная скорость выгорания;

v_l (м/с) – линейная скорость, с которой происходит распространение пламени.

При этом масса горючих материалов, сгоревших к моменту времени τ

$$M_\tau = \int_0^\tau \psi d\tau = \frac{\pi}{3} \psi_{y\partial} v_l^2 \tau^3. \quad (4.21)$$

Если пламя распространяется по полосе шириной b м, то

$$\psi = b \psi_{y\partial} v_l \tau; \quad (4.22)$$

$$M_{\tau} = \int_0^{\tau} \psi d\tau = \frac{b}{2} \psi_{y\partial} v_{\text{л}} \tau^2 . \quad (4.23)$$

Представим формулы (4.21) и (4.23) одним равенством

$$M_{\tau} = A \tau^n , \quad (4.24)$$

где $A = \frac{\pi}{3} \psi_{y\partial} v_{\text{л}}^2$, $n = 3$ – при круговом распространении пламени;

$A = b \psi_{y\partial} v_{\text{л}}$, $n = 2$ – при распространении пламени полосой.

Входящий в уравнения (4.16) – (4.19) коэффициент теплопотерь φ не является универсальной константой. Экспериментальные исследования пожаров показали, что эта величина зависит от размеров помещения, количества горючего материала, свойства ограждений и др., и, в общем случае, является переменной величиной в зависимости от времени развития пожара. Экспериментальные исследования пожаров в различных стадиях их развития показали, что доля поглощаемого ограждающими конструкциями тепла от общего выделяемого может составлять от 20% до 75% [4]. В начальной стадии пожара допускается постоянное значение φ , например, в рекомендациях «Расчет необходимого времени эвакуации людей из помещений при пожаре» (М., ВНИИПО МВД СССР, 1989) принималось $\varphi = 0,6$.

4.3. Определение времени достижения предельных значений по температуре, концентраций кислорода и токсичных газов

Уравнения (4.16), (4.18), (4.19) с разделяющимися переменными позволяют определить критическую продолжительность пожара в помещении с очагом возгорания по условиям достижения предельно допустимого значения температуры, концентраций кислорода и токсичных газов.

Введем следующее формальное обозначение

$$C = \frac{\eta Q_{\text{н}}^p (1 - \varphi) + i_{\text{э}}}{c_{\text{рт}} \rho_0 T_0} . \quad (4.25)$$

Тогда уравнение (4.16) запишется в виде

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \psi [1 - C\rho_m]. \quad (4.26)$$

Разделяя переменные и интегрируя части равенства в соответствующих пределах, с учетом (4.24) получим

$$\int_{\rho_0}^{\rho_m} \frac{d\rho_m}{1 - C\rho_m} = \frac{1}{V} \int_0^{\tau} \psi d\tau = \frac{A}{V} \tau^n. \quad (4.27)$$

Отсюда

$$\ln \frac{1 - C\rho_m}{1 - C\rho_0} = -\frac{AC}{V} \tau^n \quad \text{или} \quad \frac{1 - C\rho_m}{1 - C\rho_0} = e^{-\frac{AC}{V} \tau^n}.$$

В результате закон изменения средней плотности газовой среды в целом принимает вид

$$\rho_m = \frac{1}{C} - \left(\frac{1}{C} - \rho_0 \right) \cdot e^{-\frac{AC}{V} \tau^n}. \quad (4.28)$$

Отсюда, с учетом принятого выше равенства $\rho_m T_m = \rho_0 T_0$, получается формула, описывающая изменение средней температуры от времени

$$T_m = \frac{C\rho_0 T_0}{1 - (1 - C\rho_0) \cdot e^{-\frac{AC}{V} \tau^n}}. \quad (4.29)$$

Из равенства (4.29) можно определить критическую продолжительность пожара в помещении с очагом возгорания по условию достижения предельно допустимого значения температуры $T_{кр}$

$$\tau_{кр}^T = n \sqrt[n]{\frac{V}{AC} \ln \frac{T_{кр}(1 - C\rho_0)}{T_{кр} - C\rho_0 T_0}}. \quad (4.30)$$

Окончательное равенство (4.30) можно упростить, рассмотрев порядок входящих в него величин. Для подавляющего большинства горючих материалов теплота сгорания $Q_n^p > 10^7$ Дж/кг; коэффициент теплопотерь $\varphi \approx 0,5$; коэффициент полноты сгорания $\eta \approx 1$; теплоемкость газовой среды в помещении $c_{pm} \approx 10^3$ Дж/кг·К; произведение начальных значений плотности и температуры $\rho_0 T_0 \approx 3 \cdot 10^2$ кг·К/м³; энтальпия продуктов газификации горючего

материала i_3 пренебрежимо мала по сравнению с первым слагаемым, стоящим в числителе выражения (4.25). Тогда в знаменателе под знаком натурального логарифма по сравнению с вычитаемым $C\rho_0 T_0$ слагаемое $T_{кр}$ мало, и его можно отбросить. В числителе в круглых скобках можно отбросить 1, так как вычитаемое более чем на порядок ее превышает. В итоге упрощенное выражение для времени достижения критической температуры в помещении с очагом возгорания принимает вид:

$$\tau_{кр}^T = n \sqrt[n]{\frac{V}{AC} \ln \left(\frac{T_{кр}}{T_0} \right)}. \quad (4.31)$$

Разделим переменные и проинтегрируем в соответствующих пределах с учетом (4.24) левую и правую части уравнения (4.18)

$$\int_{\rho_0^{O_2}}^{\rho_m^{O_2}} \frac{d\rho_m^{O_2}}{L_{O_2} + C\rho_m^{O_2}} = -\frac{\eta}{V} \int_0^\tau \psi d\tau = -\frac{\eta A}{V} \tau^n. \quad (4.32)$$

Отсюда получаем закон изменения среднеобъемной концентрации кислорода в помещении от времени

$$\rho_m^{O_2} = \frac{1}{C} \left[\left(L_{O_2} + C\rho_0^{O_2} \right) \cdot e^{-\frac{AC\eta}{V} \tau^n} - L_{O_2} \right]. \quad (4.33)$$

Из равенства (4.33) можно определить критическую продолжительность пожара в помещении с очагом возгорания по условию достижения предельно допустимого значения концентрации кислорода $\rho_{кр}^{O_2}$

$$\tau_{кр}^{O_2} = n \sqrt[n]{\frac{V}{AC\eta} \ln \left(\frac{L_{O_2} + C\rho_0^{O_2}}{L_{O_2} + C\rho_{кр}^{O_2}} \right)}. \quad (4.34)$$

Разделим переменные и проинтегрируем в соответствующих пределах с учетом (4.24) левую и правую части уравнения (4.19)

$$\int_0^{\rho_m^{m.z.}} \frac{d\rho_m^{m.z.}}{L_{m.z.} - C\rho_m^{m.z.}} = \frac{\eta}{V} \int_0^\tau \psi d\tau = \frac{\eta A}{V} \tau^n. \quad (4.35)$$

Отсюда получаем закон изменения от времени концентрации токсичных газов в помещении

$$\rho_m^{m.z.} = \frac{L_{m.z.}}{C} \left[1 - e^{-\frac{AC\eta}{V} t^n} \right]. \quad (4.36)$$

Из равенства (4.36) можно определить критическую продолжительность пожара в помещении с очагом возгорания по условию достижения предельно допустимого значения концентрации токсичных газов $\rho_{кр}^{m.z.}$

$$\tau_{кр}^{m.z.} = \sqrt[n]{\frac{V}{AC\eta} \ln \left(\frac{L_{m.z.}}{L_{m.z.} - C\rho_{кр}^{m.z.}} \right)}. \quad (4.37)$$

Полученные законы (4.28), (4.29), (4.33), (4.36) изменения соответствующих величин от времени и моменты времени (4.30) или (4.31), (4.34), (4.37) достижения критических значений по температуре, концентрации кислорода и токсичных газов действительны для помещения с объемом V , где непосредственно находится очаг возгорания. Для других помещений необходимо рассмотреть процесс газообмена с учетом перепада давлений из-за различной плотности газовой среды в помещении с очагом возгорания и смежных с ним.

4.4. Определение критического времени эвакуации по потере видимости

Как уже отмечалось выше, актуальность исследования начальной стадии пожара обусловлена проблемой обеспечения безопасной эвакуации людей из помещений здания. В этот период не происходит резкого изменения таких параметров, как средняя температура, концентрации кислорода и токсичных газов. Определяющим фактором критического времени эвакуации людей является задымленность помещений [29], которая резко снижает ориентацию людей в пространстве и оказывает на них значительное психологическое воздействие. Это подтверждают и экспериментальные исследования [16], где отмечено, что при анализе результатов экспериментов по задымлению зданий в режиме естественной вентиляции ведущим опасным фактором, определяющим

допустимое время эвакуации через коридор этажа пожара и лестничную клетку на уровне этого этажа, является уменьшение видимости в дыму. Максимальная температура продуктов горения в лестничной клетке на уровне этажа пожара во всех опытах не превышала предельного для человека значения. Скорость и направление ветра оказывают существенное влияние на задымление здания. При ветре, направленном на окна помещения очага пожара, скорость и степень задымления здания возрастают. Вскрытие остекления в помещении очага возгорания уменьшает задымление здания за счет увеличения газообмена горящего помещения с улицей и более полного выгорания пожарной нагрузки.

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.

Время достижения критической концентрации дыма в помещении с очагом возгорания можно определить, решив уравнение (4.17). В нем, в отличие от уравнений (4.16), (4.18), (4.19), переменные не разделяются из-за наличия последнего члена в правой части – $k_c S_{o.k.}$. Чтобы получить аналитическое решение положим коэффициент седиментации $k_c = 0$, то есть все частицы поступают в газовую смесь и не осаживаются на ограждающие конструкции. Приходим к уравнению с разделяющимися переменными

$$V \frac{d\mu_m}{d\tau} = \psi \left[D - \frac{\eta Q_n^p (1 - \varphi) + i_3}{c_{pm} \rho_0 T_0} \mu_m \right]. \quad (4.38)$$

Принимая обозначение (4.25), разделим переменные и проинтегрируем с учетом (4.24) полученное равенство в соответствующих пределах

$$\int_0^{\mu_m} \frac{d\mu_m}{D - C\mu_m} = \frac{1}{V} \int_0^{\tau} \psi d\tau = \frac{A}{V} \tau^n. \quad (4.39)$$

Отсюда получаем закон изменения во времени плотности дыма

$$\mu_m = \frac{D}{C} \left[1 - e^{-\frac{AC}{V} \tau^n} \right]. \quad (4.40)$$

Из равенства (4.40) можно определить период времени, в течение которого в помещении с очагом возгорания плотность дыма достигнет своего критического значения $\mu_{кр}$

$$\tau_{кр}^{\partial} = n \sqrt[n]{\frac{V}{AC} \ln \left(\frac{D}{D - C\mu_{кр}} \right)}. \quad (4.41)$$

С момента времени $\tau_{кр}^{\partial}$ 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. Расход G_m выходящих из помещения с очагом возгорания газов в рассматриваемый момент времени займет некоторый секундный объем V_s ($\text{м}^3/\text{с}$), причем

$$G_m = V_s \cdot \rho_m. \quad (4.42)$$

Сравнивая равенства (4.15) и (4.42), получим

$$V_s = \frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi) + i_{\partial} \psi}{c_{pm} \rho_0 T_0}. \quad (4.43)$$

Тогда за конечный промежуток времени τ масса выталкиваемых газов M_{τ} заполнит некоторый объем V_{τ} , определяемый равенством

$$V_{\tau} = \int_0^{\tau} V_s d\tau = \frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi) + i_{\partial} \psi}{c_{pm} \rho_0 T_0} \int_0^{\tau} \psi d\tau. \quad (4.44)$$

С учетом (4.21), (4.23), (4.24) получим

$$V_{\tau} = \frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi) + i_{\partial} \psi}{c_{pm} \rho_0 T_0} A \tau^n. \quad (4.45)$$

Равенство (4.45) позволяет определить промежуток времени, за который газовая смесь с критической плотностью дыма заполнит критический объем $V_{кр}$

всех помещений, смежных с комнатой, охваченным пожаром (на этаже, в отсеке и т.д.). Этот объем вычисляется как произведение площади S_{Σ} всех смежных помещений, на расчетную высоту h_p

$$V_{кр} = S_{\Sigma} \cdot h_p, \quad (4.46)$$

где $h_p = h - h_{кр}$;

h – высота помещений;

$h_{кр}$ – критическое расстояние дымовой завесы от уровня пола.

Подставляя $V_{кр}$ в выражение (4.45), получим формулу для определения критического промежутка времени $\tau_{кр}^V$, в течение которого плотная дымовая завеса заполнит объем $V_{кр}$

$$\tau_{кр}^V = \sqrt[n]{\frac{c_{pm}\rho_0 T_0 S_{\Sigma} h_p}{A[\eta Q_n^p (1 - \varphi) + i_9]}}. \quad (4.47)$$

Окончательно критическое время эвакуации по потере видимости с учетом (4.25) принимает вид

$$\tau_{кр} = \tau_{кр}^{\partial} + \tau_{кр}^V = \sqrt[n]{\frac{V}{AC} \ln\left(\frac{D}{D - C\mu_{кр}}\right)} + \sqrt[n]{\frac{S_{\Sigma} h_p}{AC}}, \quad (4.48)$$

где $\mu_{кр}$ определяется равенством (4.1), A и n – равенством (4.24), C – равенством (4.25); в первом подкоренном выражении правой части V – это объем помещения, в котором непосредственно находится очаг возгорания; D – дымообразующая способность горючего материала.

Равенство (4.47) получено в предположении заполнения критического объема всех помещений, смежных с очагом возгорания, плотной завесой дыма сверху вниз до критического расстояния от уровня пола без учета хаотичного движения эвакуируемого потока людей. Естественно, что это движение вызывает смешение верхних и менее задымленных нижних слоев воздуха, тем самым несколько снижая концентрацию дыма в верхней части, и, следовательно, незначительно увеличивая время $\tau_{кр}^V$. Аналитический учет хаотичного движения людей, вызывающего соответственно хаотичное

конвективное смешение газовой смеси, практически невозможен. Поэтому с достаточной для практики точностью в расчетах можно определять критическое время эвакуации по потере видимости по предложенной выше формуле.

При проведении численного эксперимента установлено, что влияние энтальпии продуктов газификации горючего материала на величину среднеобъемной плотности дыма весьма незначительно. Так, в представленной ниже таблице 4.1 приведены значения μ_m в различные моменты времени, посчитанные по формуле (4.40) с учетом значения $i_3=1,8 \cdot 10^6$ Дж/кг для древесины 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 4.1

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

На рис. 4.1 представлена графическая зависимость среднеобъемной плотности дыма от времени в помещении с очагом возгорания при круговом распространении пламени (кривая 1) и при его распространении полосой (кривая 2). В расчетах принято: $\eta = 1$, $\varphi = 0,5$, $c_{pm} = 10^3$ Дж/кг·К, $\rho_0 \cdot T_0 = 3 \cdot 10^2$ кг·К/м³, $V = 60$ м³, $i_3=0$; из базы данных [41] типовой горючей нагрузки (мебель+бытовые изделия) для здания I-II степени огнестойкости $Q_n^p = 13,8 \cdot 10^6$ Дж/кг, $D = 270$ Нп·м²/кг, $\psi_{yd} = 0,0145$ кг/м²·с, $v_n = 0,0108$ м/с, ширина распространения пламени $b = 0,4$ м. Как следует из приведенных графиков, при круговом распространении пламени наблюдается более интенсивный рост числовых значений среднеобъемной плотности дыма.

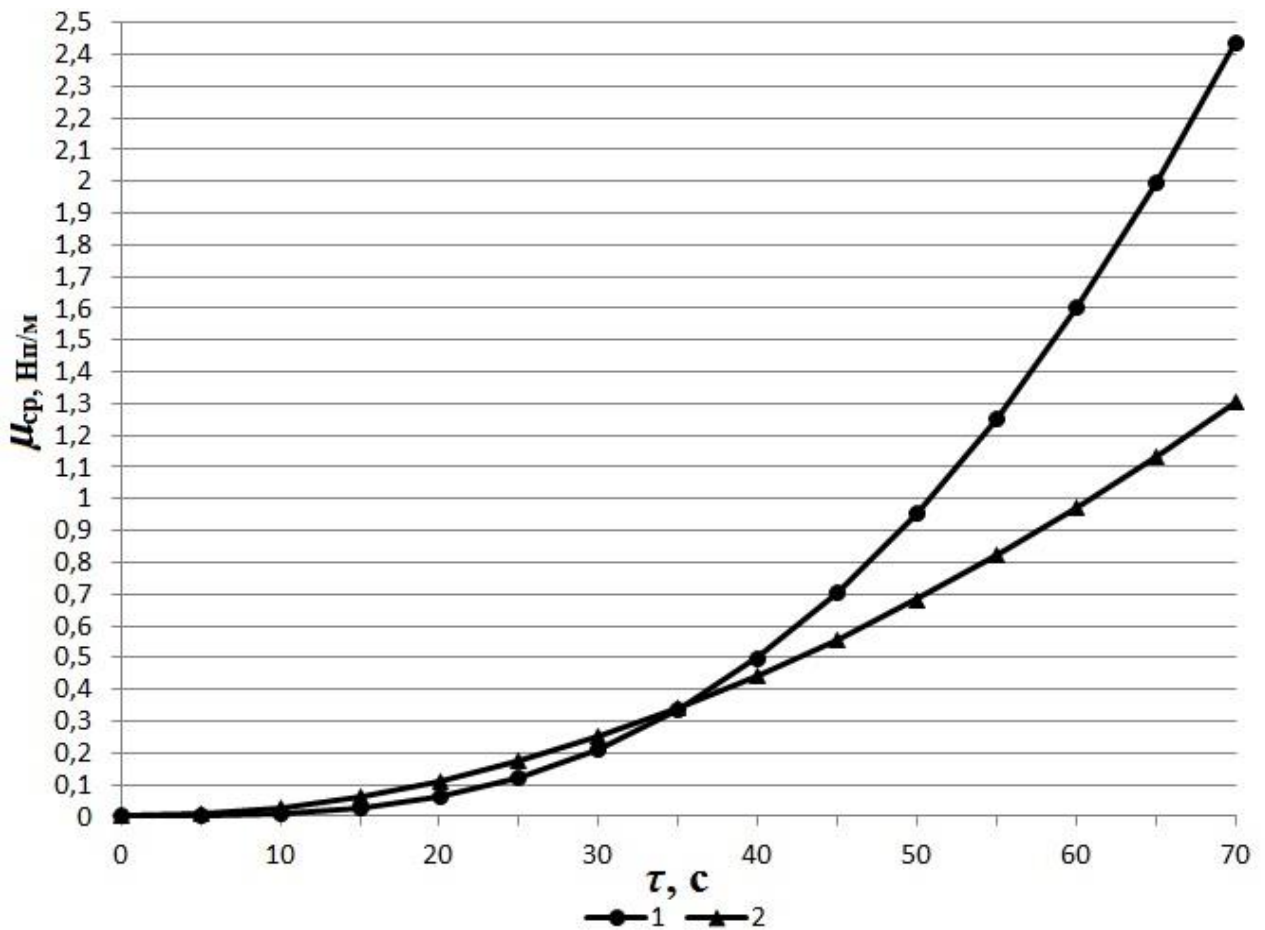


Рисунок 4.1

На рисунке 4.2 при принятых выше значениях параметров, входящих в равенство (4.40), и круговом распространении пламени представлена графическая зависимость среднеобъемной плотности дыма от времени в помещении общим объемом 60 м^3 (кривая 1) и 90 м^3 (кривая 2).

Равенство (4.40) определяет динамику задымления через среднеобъемную плотность дыма помещения в целом, не отражая распределение этого параметра по высоте помещения. При решении задачи по безопасной эвакуации людей необходимо значение плотности дыма на высоте их рабочей зоны.

Исходя из результатов теоретических и экспериментальных исследований, можно предположить подобие поля температур и поля концентрации дыма [53]. Тогда по аналогии с формулой распределения температуры, предложенной В.Н. Тимошенко, распределение плотности дыма по высоте помещения определяется выражением вида [19]

$$\mu^z = \mu_0 + (\mu_m - \mu_0) \frac{z}{h} e^{4,8 \frac{z}{h}}, \quad (4.49)$$

где μ_0 – начальное значение плотности дыма;

μ^z – плотность дыма на высоте z от уровня пола;

h – высота помещения.

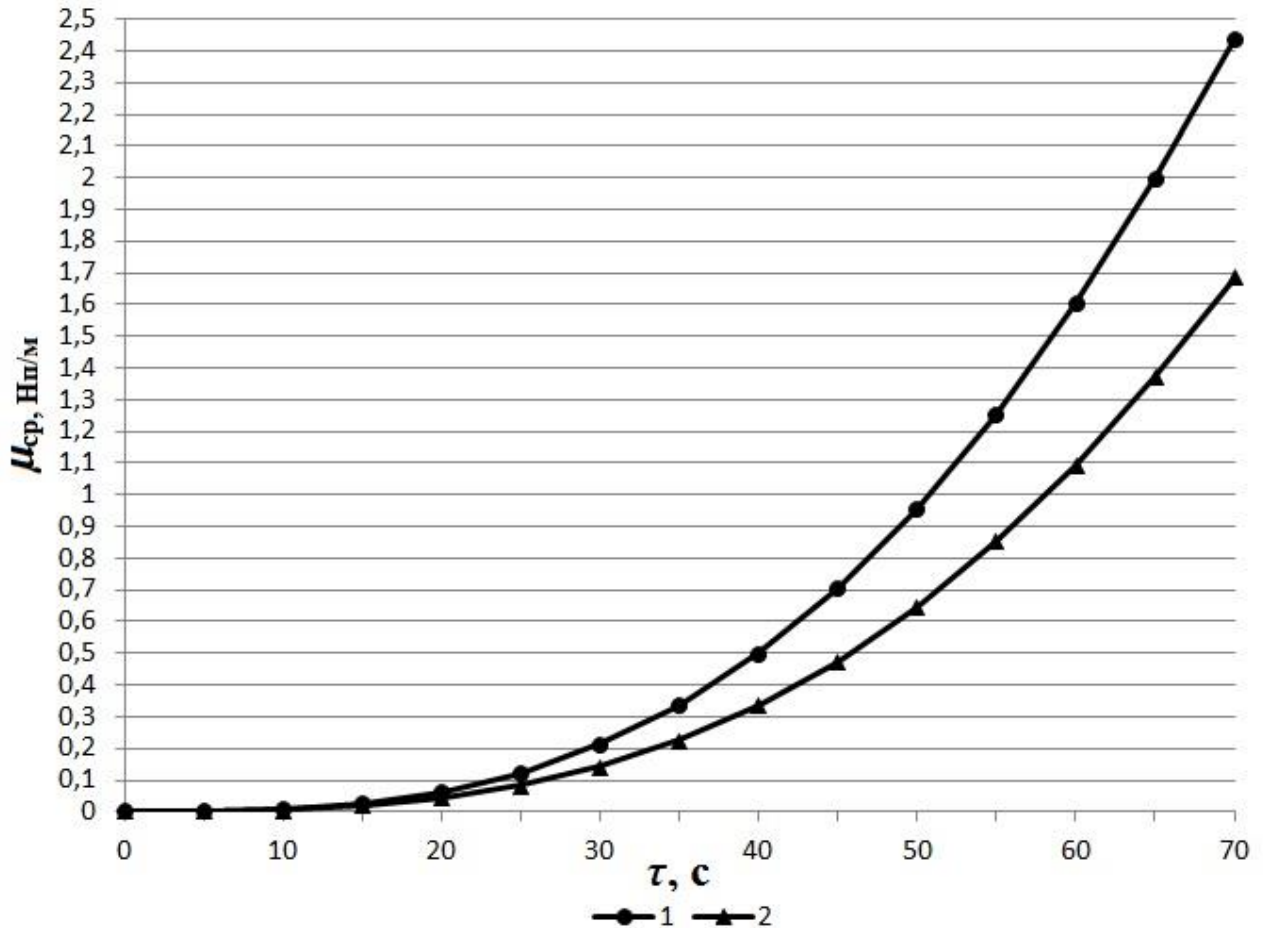


Рисунок 4.2

На рисунке 4.3 представлено распределение плотности дыма по высоте помещения до рабочей высоты 1,8 м при круговом распространении пламени и принятых выше значениях параметров пожара в помещении объемом 60 м³ в моменты времени $\tau = 10$ с (кривая 1), $\tau = 20$ с (кривая 2), $\tau = 30$ с (кривая 3). С увеличением времени пожара интенсивность распределения плотности дыма по высоте помещения возрастает.

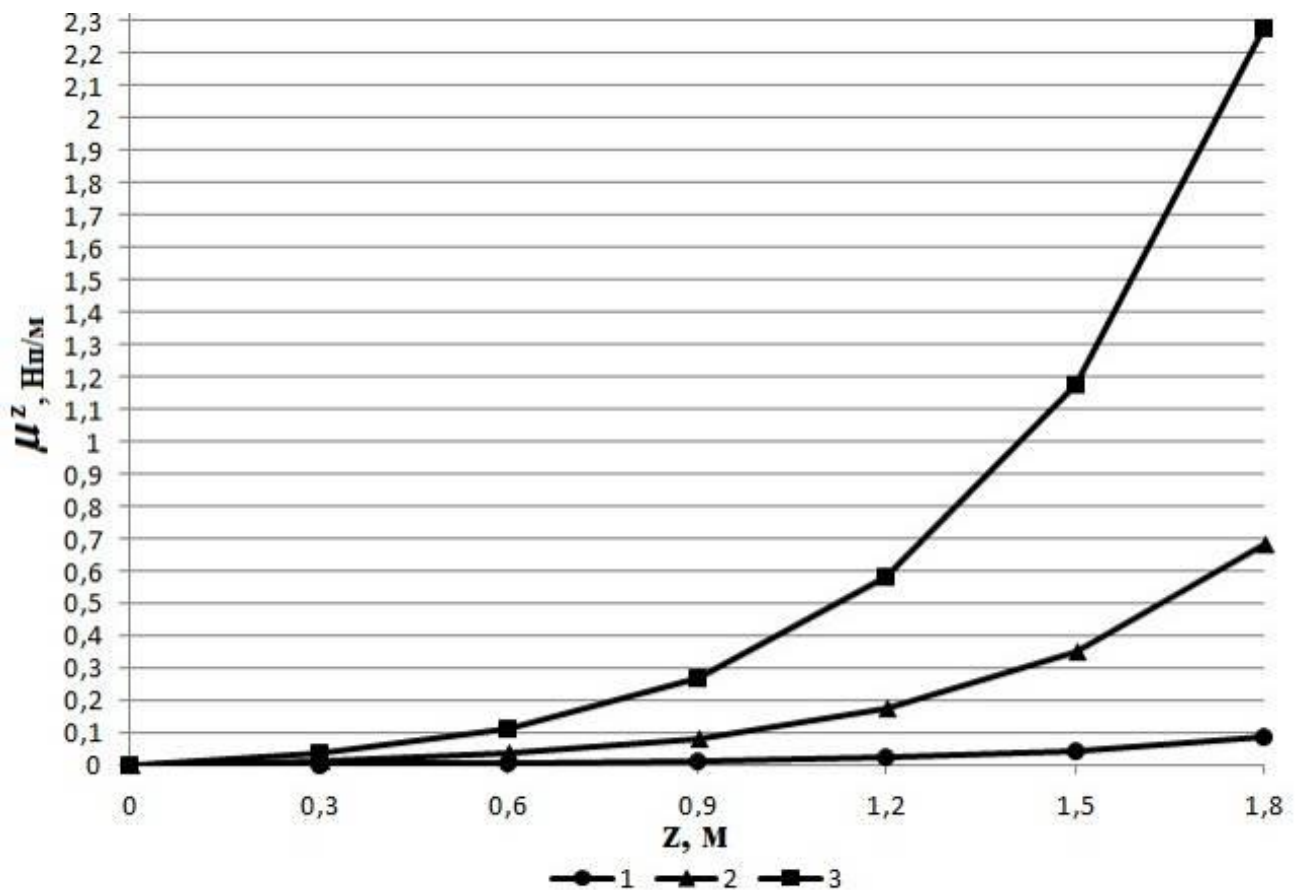


Рисунок 4.3

Равенство (4.49) позволяет определить период времени, в течение которого плотность дыма достигнет своего критического значения $\mu_{кр}^z$ на уровне z от уровня пола

$$\tau_{кр}^{\partial}(z) = \sqrt[n]{\frac{V}{AC} \ln \left(\frac{D}{D - C(\mu_{кр}^z - \mu_0) \frac{h}{z} e^{-4,8 \frac{z}{h}}} \right)}. \quad (4.50)$$

Критическое значение для оптической плотности дыма определяется из равенства (4.1).

На интенсивность роста значений $\mu_{кр}$ в значительной мере сказывается степень огнестойкости здания. Так, на рисунке 4.4 показана зависимость среднеобъемной плотности дыма от времени в помещении с очагом возгорания при распространении пламени полосой $b = 0,4$ м и общим объемом помещения

60 м³ для здания III-IV степени огнестойкости (кривая 1, $\psi_{y\delta} = 0,0344$ кг/м²·с, $v_d = 0,0465$ м/с) и для здания I-II степени огнестойкости (кривая 2, $\psi_{y\delta} = 0,0145$ кг/м²·с, $v_d = 0,0108$ м/с) при прочих равных параметрах пожара. Интенсивность возрастания среднеобъемной плотности дыма в первом случае значительно выше, чем во втором.

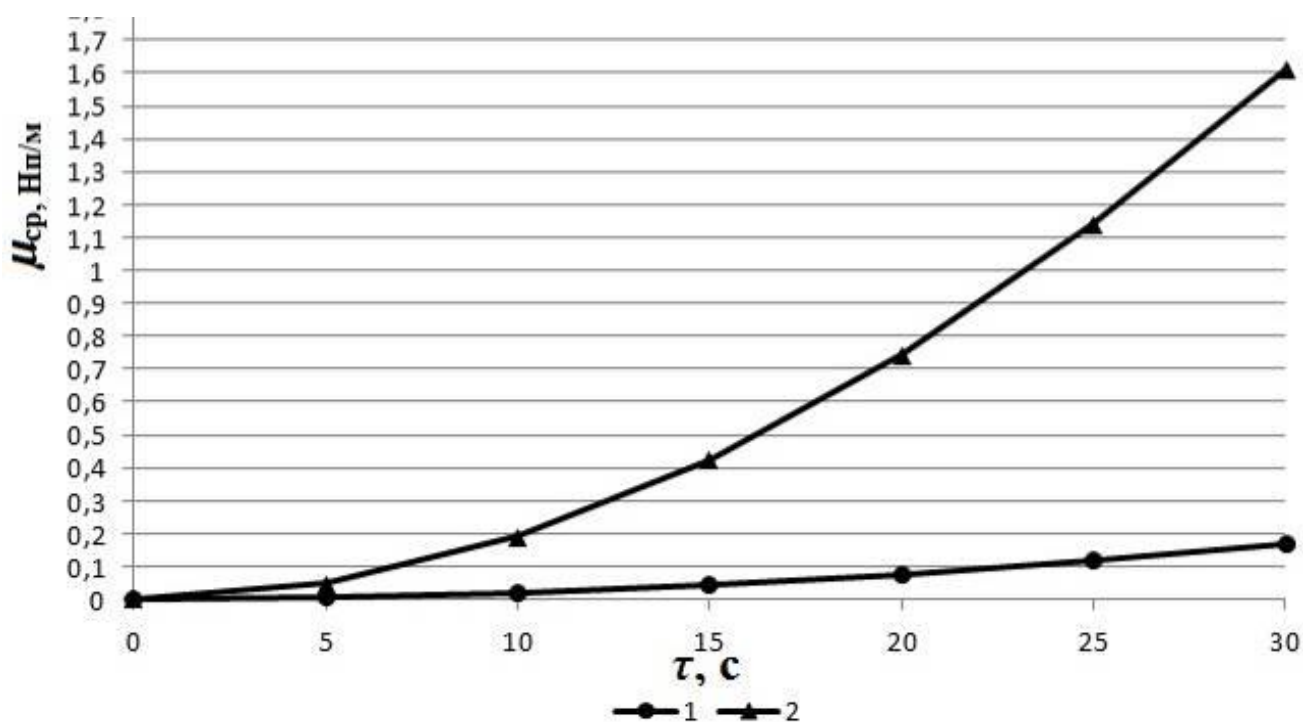


Рисунок 4.4

4.5. Условия применимости формул по определению времени достижения предельных значений ОФП

Аналитическое решение полной неупрощенной системы дифференциальных уравнений пожара (4.2) – (4.7) с учетом газообмена помещения с окружающей средой, теплообменом с ограждающими конструкциями, дополненной формулами скорости выгорания горючего материала и тепловыделения, получить невозможно. С целью получения этого решения выше были приняты некоторые допущения, характерные для начальной стадии развития пожара. Одним из основных предположений на этой стадии является отсутствие поступления воздуха из окружающей среды – $G_a=0$,

то есть процесс газообмена идет в одном направлении через все имеющиеся проемы и щели. Но это условие даже на начальной стадии развития пожара будет выполняться лишь при небольшом количестве открытых проемов. В работе [45] показано, что рассматриваемое условие можно применять, если критерий проемности помещения $\Pi \leq 5$, где значение Π вычисляется по формуле

$$\Pi = \frac{S_{np} \sqrt{h_{np} g}}{V} \tau_{кр}^{офпн}. \quad (4.51)$$

Здесь S_{np} – общая площадь открытых проемов; h_{np} – высота проемов; g – ускорение свободного падения ($9,8 \text{ м/с}^2$); V – объем помещения с очагом возгорания; $\tau_{кр}^{офпн}$ – время достижения критического значения одного из опасных факторов пожара, вычисляемых по полученным выше равенствам (4.30) или (4.31), (4.34), (4.37), (4.41).

Лишь через некоторое время после начала пожара, когда средняя температура среды в помещении достигнет определенного значения, процесс газообмена становится двусторонним. Как правило, в этот момент $\Pi > 5$, следует учесть поступление свежего воздуха в помещение, для расчетов необходимо использовать полную систему уравнений (4.2) – (4.7).

Односторонний газообмен происходит в течение относительно небольшого промежутка времени. За этот промежуток концентрация кислорода и средняя температура в помещении изменяются незначительно. Тогда в этот период можно считать постоянными дымообразующую способность горючего материала D и коэффициент полноты сгорания η .

Из-за наличия проемов и щелей подавляющее большинство помещений являются негерметичными. Следовательно, среднее давление среды можно принять постоянным, равным давлению наружного воздуха и не зависящим от времени. Помимо этих условий в начальной стадии пожара можно пренебречь влиянием уменьшения содержания кислорода на процесс выгорания горючей нагрузки.

4.6. Выводы по четвертой главе

1. В данном разделе 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.

2. Массовая эвакуация людей из помещений горящего здания проводится на начальной стадии развития пожара, в течение которой не происходит резкого изменения таких опасных для организма человека факторов, как температура, концентраций токсичных газов и кислорода, особенно в помещениях, смежных с тем, где непосредственно находится очаг возгорания. Определяющим фактором критического времени эвакуации людей является задымленность помещений, 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. В данной главе получена аналитическая формула для определения критического промежутка времени, в течение которого плотная дымовая завеса заполнит весь объем смежных с очагом возгорания помещений сверху вниз до критического расстояния от уровня пола без учета хаотичного движения эвакуируемого потока людей. Полученная аналитическая формула позволяет использовать ее в практике инженерных расчетов при рассмотрении проблемы безопасной эвакуации людей из помещений при возникновении пожара в здании.

3. Рассмотрено распределение плотности дыма по высоте помещения. Построены графические зависимости при различных параметрах, входящих в исходные формулы. Дан анализ условий применимости представленных аналитических формул и полученных с помощью этих равенств графических зависимостей. 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.

ГЛАВА 5. УЧЕТ РАБОТЫ ВЫТЯЖНОЙ ПРОТИВОДЫМНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЖАРА

5.1. Разрешающая система дифференциальных уравнений

Как уже отмечалось в п. 4.2 в интегральной математической модели пожара состояние газовой среды описывается усредненными по объему параметрами: p_m – среднеобъемное давление ($\text{Н}\cdot\text{м}^2$); T_m – среднemasсовая температура (К); среднеобъемные плотности ($\text{кг}/\text{м}^3$) ρ_m – газовой среды в целом, $\rho_m^{O_2}$ – кислорода, $\rho_m^{m.z.}$ – токсичных газов (монооксид углерода, диоксид углерода, хлористый водород); μ_m – среднеобъемная оптическая плотность дыма ($\text{Нп}/\text{м}$). Процесс теплообмена описывается с помощью этих среднеобъемных значений параметров газовой среды, с учетом полученных экспериментально зависимостей процессов выгорания материала и передачи тепла в ограждающие конструкции. При этом состояние газовой среды описывается уравнением Менделеева-Клайперона, а сама газовая среда это смесь идеальных газов [4, 41].

Получим разрешающую систему дифференциальных уравнений интегральной модели пожара в условиях работы вытяжной противодымной вентиляции. При этом предполагается, что газообмен через естественную вентиляцию осуществляется в двустороннем направлении, а система вытяжной противодымной вентиляции работает в одностороннем – на вытяжку. Учитывается также конвективная и радиационная составляющие процесса теплообмена в ограждающие конструкции.

Уравнение материального баланса для газовой среды (4.2), согласно которому изменение за единицу времени массы газовой среды в помещении должно быть равно суммарной массе потоков, проходящих через границы системы, принимает вид

$$\frac{d(\rho_m V)}{d\tau} = \psi + G_a - G_m - G_g, \quad (5.1)$$

где G_g (кг/с) – массовый расход газа (продуктов горения), уходящего из помещения в окружающую среду через систему вытяжной противодымной вентиляции.

Уравнение (4.3) энергетического баланса газовой среды при пожаре в помещении примет следующий вид

$$\frac{1}{k_m - 1} \frac{d(p_m V)}{d\tau} = \eta Q_n^p \psi + i_3 \psi + c_{pa} T_a G_a - c_{pm} a_T T_m (G_m + G_g) - Q_{o.k.}, \quad (5.2)$$

В правой части последнее вычитаемое учитывает тепловой поток, уходящий через ограждающие конструкции, а предпоследнее – тепловые потоки газов, уходящих из помещения через системы естественной и вытяжной противодымной вентиляции.

Уравнение баланса оптического количества дыма (4.4) принимает вид

$$\frac{d(\mu_m V)}{d\tau} = D\psi - \frac{\mu_m k_\partial}{\rho_m} (G_m + G_g) - k_c S_{o.k.}. \quad (5.3)$$

Здесь первое слагаемое правой части отражает количество дыма, образующегося в процессе горения за единицу времени, второе – количество дыма, уходящего через системы естественной и вытяжной вентиляций, третье – количество частиц дыма, осаждающихся на поверхность ограждающих конструкций помещения.

Уравнение баланса массы кислорода (4.5), учитывающее, что очаг пожара поглощает кислород, примет вид:

$$\frac{d(\rho_m^{O_2} V)}{d\tau} = \frac{\rho^{O_2}}{\rho} G_a - k_{O_2} \frac{\rho_m^{O_2}}{\rho_m} (G_m + G_g) - L_{O_2} \psi \eta. \quad (5.4)$$

Здесь источником кислорода является приток воздуха через естественную вентиляцию, а потребителем помимо непосредственно очага возгорания является также естественная и вытяжная противодымная вентиляции.

Уравнение материального баланса (4.6) токсических продуктов горения примет следующий вид:

$$\frac{d(\rho_m^{m.z.} V)}{d\tau} = L_{m.z.} \psi \eta - k_{m.z.} \frac{\rho_m^{m.z.}}{\rho_m} (G_m + G_g). \quad (5.5)$$

Здесь первый член правой части представляет собой количество токсичного газа, образующегося при горении за единицу времени; второй — количество токсичного газа, уходящего через системы естественной и вытяжной противодымной вентиляции.

К основным разрешающим дифференциальным уравнениям (5.1) – (5.5) интегральной математической модели необходимо присоединить начальные условия, а также представить в явном виде некоторые входящие в эти уравнения функциональные зависимости. При этом часть этих функций может быть представлена в точной аналитической форме, а часть описывается в виде аппроксимации эмпирических данных.

Входящая в правые части уравнений (5.1) – (5.5) функция ψ имеет различный вид в зависимости от того, как распространяется пожар [41]. Если пожар распространяется по поверхности твердых горючих материалов по кругу, то

$$\psi = \pi \psi_{y\partial} v_l^2 \tau^2, \quad (5.6)$$

где $\psi_{y\partial}$ (кг/м²·с) – удельная массовая скорость выгорания;

v_l (м/с) – линейная скорость, с которой распространяется пламя.

Если пламя распространяется по полосе шириной b м, то

$$\psi = b \psi_{y\partial} v_l \tau. \quad (5.7)$$

Количество воздуха G_a , которое поступает в помещение из окружающей среды через проемы за счет разности внешнего и внутреннего давлений, и массовый расход уходящих из помещения через естественную вентиляцию газов G_m (продуктов горения), определяются по формулам [40, 41], в которых произведено суммирование по всем N проемам

$$G_a = \frac{2}{3} \sqrt{2g\rho_0(\rho_0 - \rho_m)} \cdot \sum_{i=1}^N \xi_i b_i \left[|y_* - y_i^H|^{1.5} - |y_* - y_i|^{1.5} \right], \quad (5.8)$$

$$G_m = \frac{2}{3} \sqrt{2g\rho_m(\rho_0 - \rho_m)} \cdot \sum_{i=1}^N \xi_i b_i \left[|y_* - y_i^g|^{1,5} - |y_* - y_i|^{1,5} \right], \quad (5.9)$$

где

ρ_0 (кг/м³) – плотность наружного воздуха;

ξ_i – коэффициент сопротивления проема с номером i ; если $\xi_i = 1$, то проем открыт полностью, если $\xi_i = 0$, то проем полностью закрыт;

b_i (м) – ширина проема с номером i ;

y_* (м) – высота от уровня пола до плоскости равных давлений;

y_i^h (м) – высота от уровня пола до нижнего края проема с номером i ;

y_i^g (м) – высота от уровня пола до верхнего края проема с номером i ;

y_i (м) – формальный параметр, определяемый для проема с номером i из условий:

$$y_i = \begin{cases} y_i^h, & \text{если } y_* \leq y_i^h, \\ y_*, & \text{если } y_i^h \leq y_* \leq y_i^g, \\ y_i^g, & \text{если } y_* \leq y_i^g. \end{cases} \quad (5.10)$$

При этом высота y_* плоскости равных давлений вычисляется по формуле [41]:

$$y_* = \frac{H}{2} - \frac{p_m - p_0}{g \cdot (\rho_0 - \rho_m)}, \quad (5.11)$$

где H (м) – высота помещения;

p_0 (Па) – плотность наружного воздуха;

g (м/с²) – ускорение свободного падения.

В связи с тем, что включение противодымной вытяжной вентиляции происходит в некоторый момент времени τ_e , то массовый расход газа, выбрасываемого системой вытяжной вентиляции в окружающую среду определяется соотношением

$$G_e = \begin{cases} 0, & \text{при } \tau < \tau_e; \\ \rho_m V_e, & \text{при } \tau \geq \tau_e. \end{cases} \quad (5.12)$$

Здесь V_g (м^3) – объем газов, выводимых системой вытяжной противодымной вентиляции.

Суммарный тепловой поток Q_w через ограждающие конструкции помещения (стены, потолок, пол) [40, 41]

$$Q_w = \alpha \cdot S_w (T_m - T_w), \quad (5.13)$$

где

α ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$) – коэффициент теплопередачи между газовой средой и ограждающими конструкциями;

S_w (м^2) – площадь поверхности ограждающих конструкций;

T_w (К) – температура внутренней поверхности ограждающих конструкций.

При этом предполагается, что α и T_w не зависят от пространственного расположения очага пожара и типа конструкций.

Коэффициент теплопередачи между газовой средой и ограждающими конструкциями при пожаре в помещении определяется по эмпирической формуле [41]

$$\alpha = \begin{cases} 4,07 \cdot (T_m - T_w)^{1/3}, & \text{при } T_m < 333\text{К}; \\ 11,6 \cdot e^{0,0023(T_m - 273)}, & \text{при } T_m \geq 333\text{К}. \end{cases} \quad (5.14)$$

Температура внутренней поверхности ограждающих конструкций определяется равенством [41]

$$T_w = T_0 + 0,2(T_m - T_0) + 0,00065(T_m - T_0)^2, \quad (5.15)$$

где T_0 (К) – начальная температура окружающей среды.

В качестве начальных исходных параметров при нормальных условиях в помещении до начала пожара приняты следующие значения: среднеобъемная плотность среды $\rho_0 = 1,2041 \text{ кг}/\text{м}^3$; среднеобъемное давление $p_0 = 101325 \text{ Па}$; среднеобъемная парциальная плотность кислорода $\rho_0^{O_2} = 0,2787 \text{ кг}/\text{м}^3$; среднеобъемная парциальная плотность токсичных газов (монооксид углерода, диоксид углерода, хлористый водород) $\rho_0^{m.z.} = 0$; среднеобъемная оптическая плотность среды $\mu_0 = 0$ (среда прозрачна).

Уравнениями (5.1) – (5.15) представлены интегральная математическая модель пожара, в которой учитывается работа противодымной вытяжной вентиляции с учетом ее времени включения и объемного расхода. Для получения решения представленной системы уравнений к ней необходимо присоединить дополнительное равенство, которое описывает в динамике удельную массовую скорость неустановившегося процесса выгорания жидкости и учитывает функционирование системы противодымной вытяжной вентиляции. Анализ формул для расчета динамики удельной массовой скорости выгорания жидкости и результаты соответствующих экспериментальных исследований изложены в следующих разделах диссертационной работы.

5.2. Анализ формул для расчета скорости выгорания жидкости и результатов соответствующих экспериментальных исследований

Горение жидкости в помещении представляет собой сложный физико-химический процесс, зависящий от ее физико-химических свойств, концентрации кислорода, площади поверхности горения, температуры и т.д. В настоящее время проведено большое количество экспериментальных исследований динамики удельной массовой скорости выгорания жидкости как в натуральных помещениях, так и в физических моделях [4, 24, 40, 41, 57, 60]. Все исследования несут частный характер и на их основе разработан ряд эмпирических уравнений следующего общего вида [24]

$$\psi = \varphi_1 \cdot S_1, \quad (5.16)$$

$$\psi = \varphi_2 \cdot S_w, \quad (5.17)$$

где φ_1 , φ_2 – коэффициенты пропорциональности, определяемые по экспериментальным данным или приближенным аналитическим равенствам, зависящие от физико-химических свойств жидкости, концентрации кислорода, температуры и других факторов;

S_1 , S_w – площади горения жидкости и общая площадь открытых проемов в ограждающих конструкциях.

Одной из характеристик, оказывающей влияние на массовую скорость выгорания жидкости, является коэффициент полноты сгорания η , который отражает отношение сгоревшей массы вещества к его первоначальной. В работе [4] для определения коэффициента полноты горения получена эмпирическая формула, справедливая в диапазоне среднеобъемной массовой доли кислорода газовой среды от 0,105 до 0,23

$$\eta = 0,63 + 0,2x_m^{O_2} + 1500(x_m^{O_2})^6, \quad (5.18)$$

где $x_m^{O_2}$ – среднеобъемная массовая доля кислорода в газовой среде помещения.

В работах [7, 72] предложено использовать экспериментальные формулы, полученные экспериментальным путем, описывающие линейную и квадратичную зависимости от среднеобъемной массовой доли кислорода газовой среды при пожаре в помещении

$$\eta = \eta_0 \cdot \bar{X}, \quad (5.19)$$

$$\eta = \eta_0 \cdot (2\bar{X} - \bar{X}^2), \quad (5.20)$$

где η_0 – коэффициент полноты горения на открытом воздухе;

$\bar{X} = \frac{x_m^{O_2} - x_{\min}^{O_2}}{x_a^{O_2} - x_{\min}^{O_2}}$ – отношение, которое характеризует запас кислорода в газовой среде на поддержание горения.

В фундаментальных работах [4, 15, 41] выделяют два пограничных режима пожара:

- режим, регулируемый пожарной нагрузкой, имеющий место, когда в помещении для поддержания горения имеется достаточное количество кислорода. В этом случае удельная массовая скорость выгорания зависит только от количества пожарной нагрузки;

- режим, регулируемый вентиляцией, имеющий место, когда кислорода в помещении не достаточно для поддержания горения. В этом случае удельная массовая скорость выгорания зависит от количества поступающего в помещение через механическую и естественную вентиляции воздуха.

В реальных условиях процесс выгорания жидкости в помещении осуществляется в промежуточном режиме, при котором на удельную массовую скорость выгорания жидкости оказывает влияние количество пожарной нагрузки, а источниками кислорода являются одновременно как внутренняя газовая среда, так и поступающий из внешней среды воздух.

Чаще всего для определения удельной массовой скорости выгорания пожарной нагрузки применяется равенство, предложенное профессором Ю.А. Кошмаровым [41]

$$\psi_{y\partial} = K\psi_{y\partial}^0 - (1 - K) \frac{0,23(G_a + G_{ex})}{L_{O_2} \cdot S_f}, \quad (5.21)$$

где

$\psi_{y\partial}^0$ (кг/м²·с) – удельная скорость выгорания на открытом воздухе;

G_{ex} (кг/с) – массовый приток воздуха через приточную вентиляцию;

L_{O_2} (кг/кг) – потребление кислорода (количество кислорода, которое необходимо для сгорания единицы массы горючей нагрузки);

S_f (м²) – площадь горения;

K – функция режима пожара, описываемая следующим эмпирическим уравнением

$$K = (x_m^{O_2} / 0,23)^2 \cdot e^{2-x_m^{O_2} / 0,115}. \quad (5.22)$$

В работах [24, 57] предлагается принять выражение для коэффициента полноты сгорания в виде равенства

$$\eta = K\eta_0 + (1 - K) \frac{x_a^{O_2} (G_a + \rho_a \cdot V_{ex})}{L_{O_2} \cdot \psi}, \quad (5.23)$$

где

$x_a^{O_2}$ – массовая концентрация кислорода в воздухе при нормальных условиях;

V_{ex} – объемная производительность приточной вентиляции.

Для входящей в равенства (5.21), (5.23) функции режима пожара K в работах [24, 41, 57] предлагается принять следующее выражение

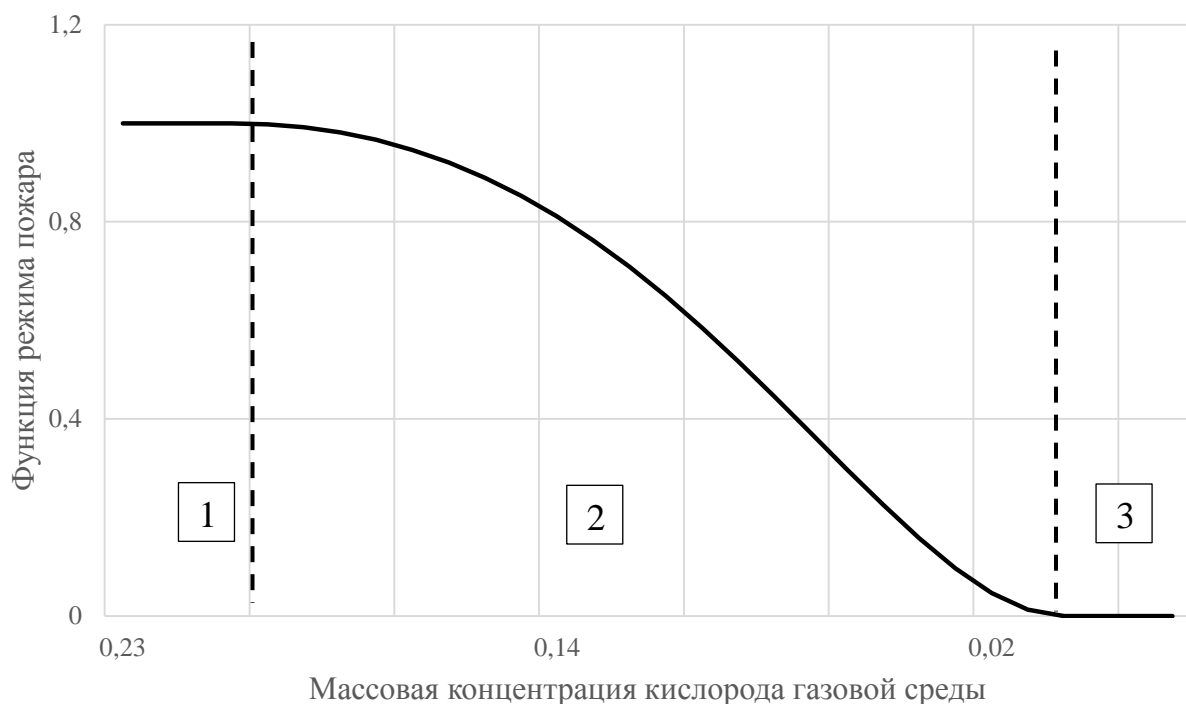
$$K = \begin{cases} 0, & \text{при } Z < 0; \\ Z^2 \cdot e^{2(1-Z)}, & \text{при } 0 \leq Z \leq 1; \\ 1, & \text{при } Z \geq 1, \end{cases} \quad (5.24)$$

где Z – коэффициент, характеризующий промежуточный режим пожара, определяемый отношением $Z = \frac{x_m^{O_2} - x_{ml}^{O_2}}{x_{mi}^{O_2} - x_{ml}^{O_2}}$;

$x_{ml}^{O_2}$ – среднеобъемная концентрация кислорода, при которой завершается переход от ПРН к ПРВ;

$x_{mi}^{O_2}$ – среднеобъемная концентрация кислорода, при которой начинается переход от ПРН к ПРВ.

График изменения функции режима пожара от среднеобъемной массовой доли кислорода газовой среды при пожаре в помещении показан на рисунке 5.1.



1 – режим пожара, регулируемого нагрузкой (ПРН); 2 – промежуточный режим пожара;
3 – режим пожара, регулируемого вентиляцией (ПРВ).

Рисунок 5.1 – График изменения функции режима пожара в зависимости среднеобъемной массовой концентрации кислорода газовой среды

Функциональная зависимость (5.21) описывает влияние изменения концентрации кислорода газовой среды на удельную массовую скорость выгорания жидкости. Концентрацию кислорода газовой среды можно определить из уравнения (5.4), содержащего переменные, описывающие массовые расходы воздуха через естественную и механическую вентиляции. Следовательно, в равенстве (5.21) неявно учитывается работа системы противодымной вытяжной вентиляции с помощью изменения массовой доли кислорода в газовой среде. Однако, как будет показано при анализе ряда экспериментальных исследований, удельная массовая скорость выгорания не так быстро откликается на изменение концентрации кислорода газовой среды в сторону увеличения, что обусловлено, прежде всего, затратами времени на прогрев жидкости. Кроме этого, в функциональной зависимости (5.21) не учитывается время включения противодымной вытяжной вентиляции и ее объемный расход, что очевидным образом влияет на тепломассообменные процессы пожара.

В отмеченных выше работах [24, 57] для массовой скорости выгорания (газификации) пожарной нагрузки предложена следующая полуэмпирическая зависимость

$$\psi = \begin{cases} \psi_{y0} \cdot \sqrt{\tau/\tau_*}, & \text{при } \tau \leq \tau_*; \\ \psi_{y0}, & \text{при } \tau > \tau_*, \end{cases} \quad (5.25)$$

где τ_* – время стабилизации горения.

Представленная зависимость носит «гипотетический» характер, и для его применения на практике требуются экспериментальные данные определения времени стабилизации горения жидкости в конкретно рассматриваемых условиях.

Аналогичная зависимость предложена в работе [43], где представлено эмпирическое уравнение, описывающее зависимость удельной массовой скорости выгорания жидкости от тех же переменных, что и в (5.25) с учетом весовых коэффициентов, полученных экспериментальным путем

$$\psi_{y\partial} = \begin{cases} \psi_{y\partial}^0 \cdot (0,3 + 0,7\sqrt{\tau/\tau_*}), & \text{при } \tau \leq \tau_*; \\ \psi_{y\partial}^0, & \text{при } \tau > \tau_*, \end{cases} \quad (5.26)$$

При использовании равенств (5.21), (5.25), (5.26) необходимо задать установившуюся удельную массовую скорость выгорания жидкости и время стабилизации процесса горения. Эти значения зависят от многих факторов, которые не учтены в представленных зависимостях, и могут быть получены экспериментально для некоторых частных случаев. Это приводит к погрешностям при проведении практических расчетов и ограничивает область применения этих равенств.

Экспериментальные исследования динамики удельной массовой скорости выгорания жидкости представлены в работах [6, 40, 46, 117]. При этом среднее значение удельной массовой скорости выгорания жидкости во всех экспериментальных исследованиях рассчитывается косвенным методом посредством следующей формулы

$$\bar{\psi}_{y\partial} = \frac{\Delta M}{S_f \cdot \tau}, \quad (5.27)$$

где ΔM – масса выгоревшей жидкости за время τ .

Так, в работе [6] исследовалась динамика удельной массовой скорости выгорания дизельного топлива. В процессе проведения опытов диаметры поддонов, в которые заливалась горючая жидкость, изменялись от 0,07 м до 0,56 м. Результаты экспериментальных исследований динамики удельной массовой скорости выгорания дизельного топлива при различных диаметрах поддонов представлены на рисунках 5.2 и 5.3 соответственно. Эти графики отражают качественный характер динамики удельной массовой скорости выгорания жидкости и являются приближенными. Среднее значение полученных экспериментальных данных показано на рисунках сплошной линией.

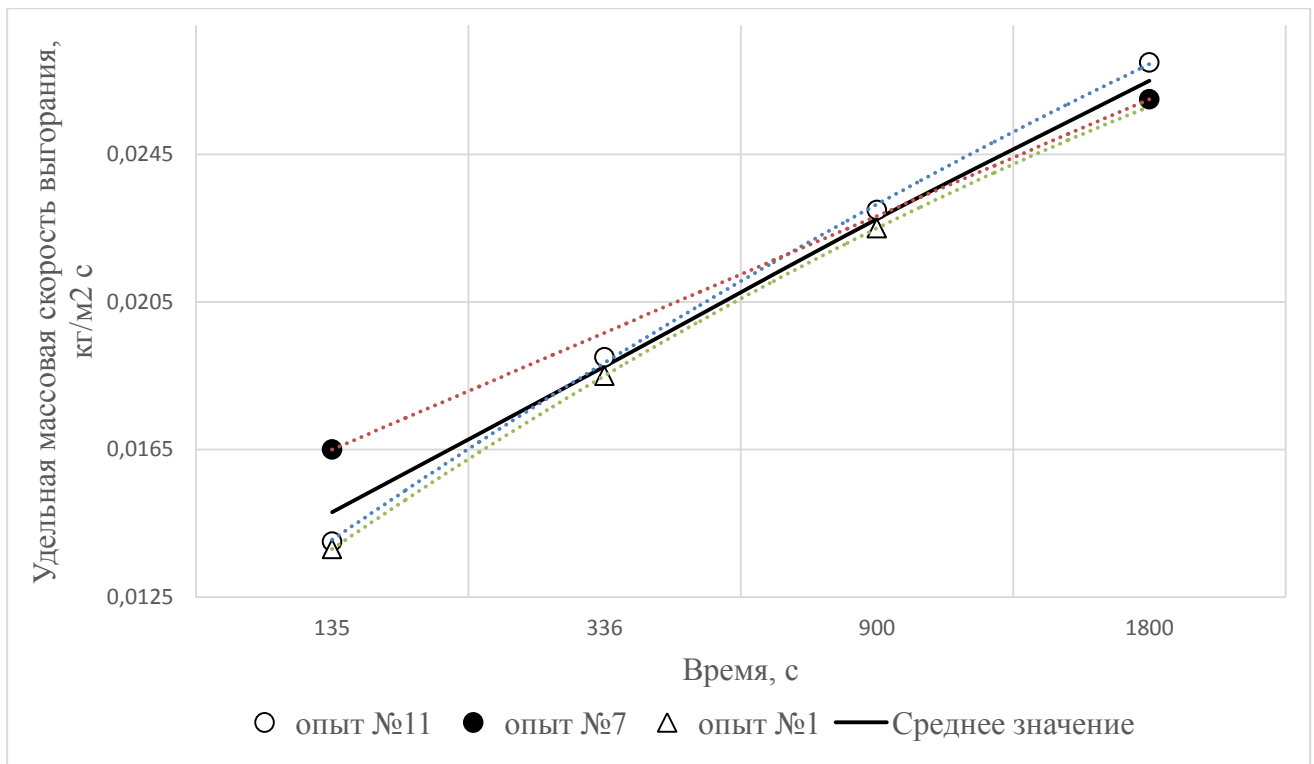


Рисунок 5.2 – Средняя удельная массовая скорость выгорания дизельного топлива в зависимости от времени при диаметре поддона 0,226 м

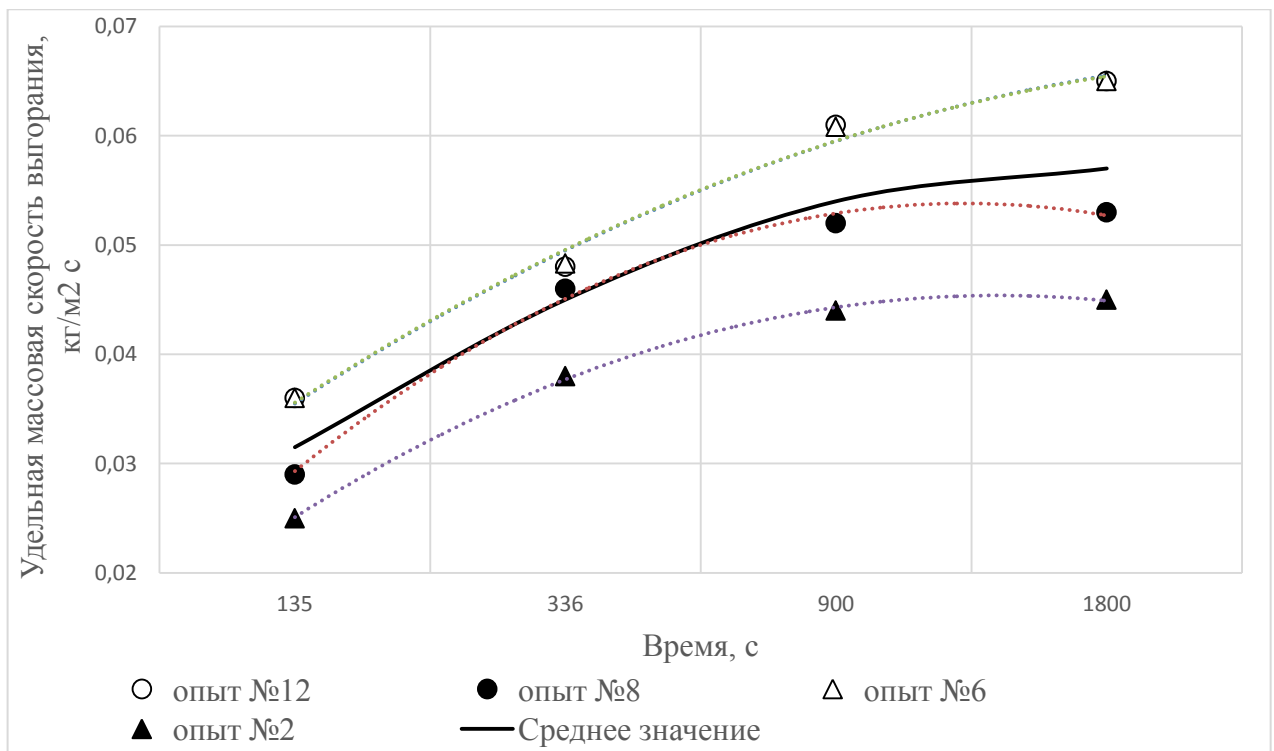


Рисунок 5.3 – Средняя удельная массовая скорость выгорания дизельного топлива в зависимости от времени при диаметре поддона 0,339 м

На представленных экспериментальных кривых не зафиксировано время стабилизации горения дизельного топлива, которое составляет значительную величину. На среднее значение удельной массовой скорости выгорания и время стабилизации горения дизельного топлива оказывает влияние также и диаметр поддона.

В той же работе [6] выполнено экспериментальное исследование динамики удельной массовой скорости выгорания жидкости в натурном помещении с геометрическими размерами: длина 66 м, ширина 18 м, высота 5,2 м. В одной из ограждающих помещение стен был выполнен оконный проем площадью 13 м² и два проема суммарной площадью 6 м², расположенных в потолке. В качестве пожарной нагрузки использовался метиловый спирт в металлических поддонах диаметром 1,95 м, 2,76 м и 3,39 м. Результаты экспериментального исследования представлены на рисунке 5.4.

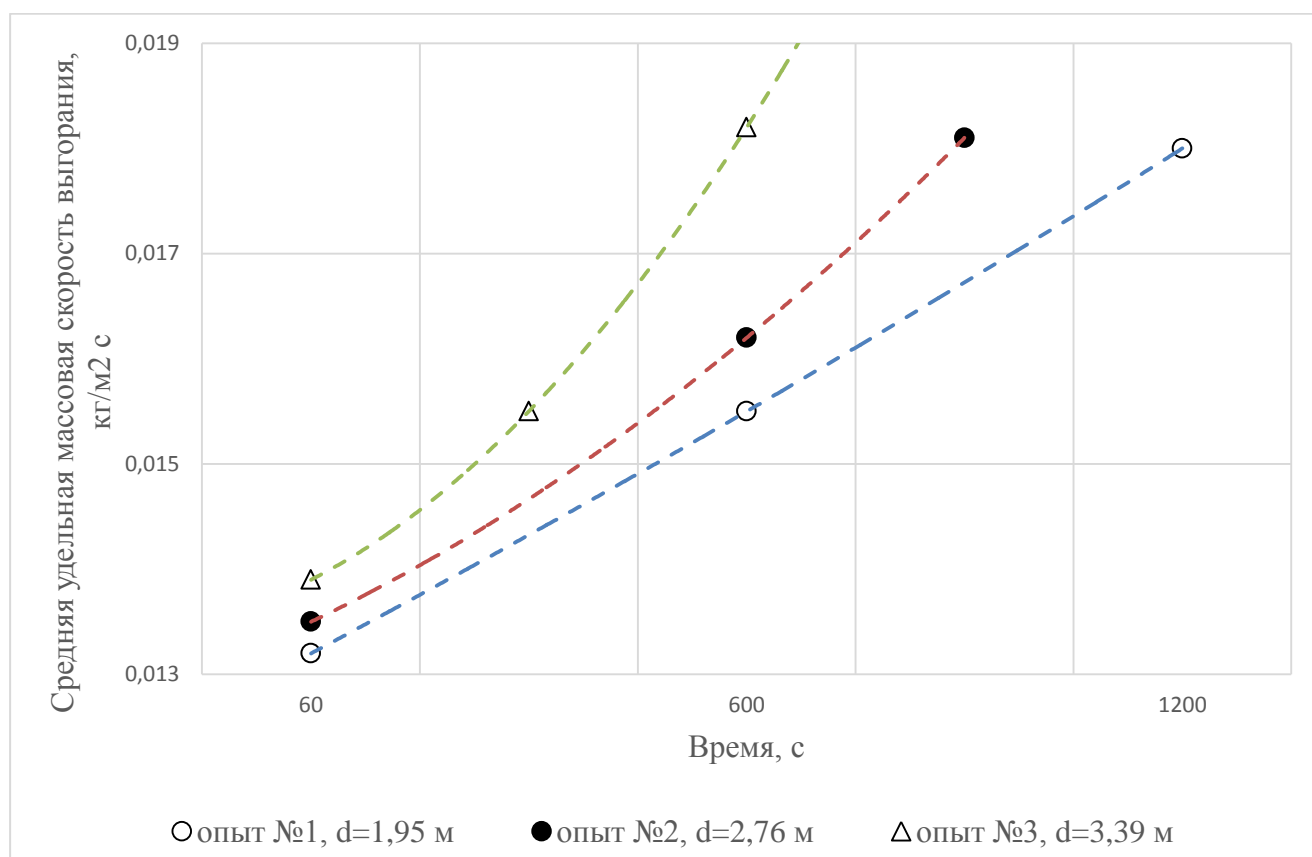


Рисунок 5.4 – Удельная массовая скорость выгорания метилового спирта в зависимости от времени в натурном помещении при различных диаметрах поддона

Анализ полученных кривых показывает, что и в натуральных испытаниях имеет место неустановившийся процесс горения пожарной нагрузки, а значения удельной массовой скорости выгорания и времени стабилизации горения зависят от диаметра поддона.

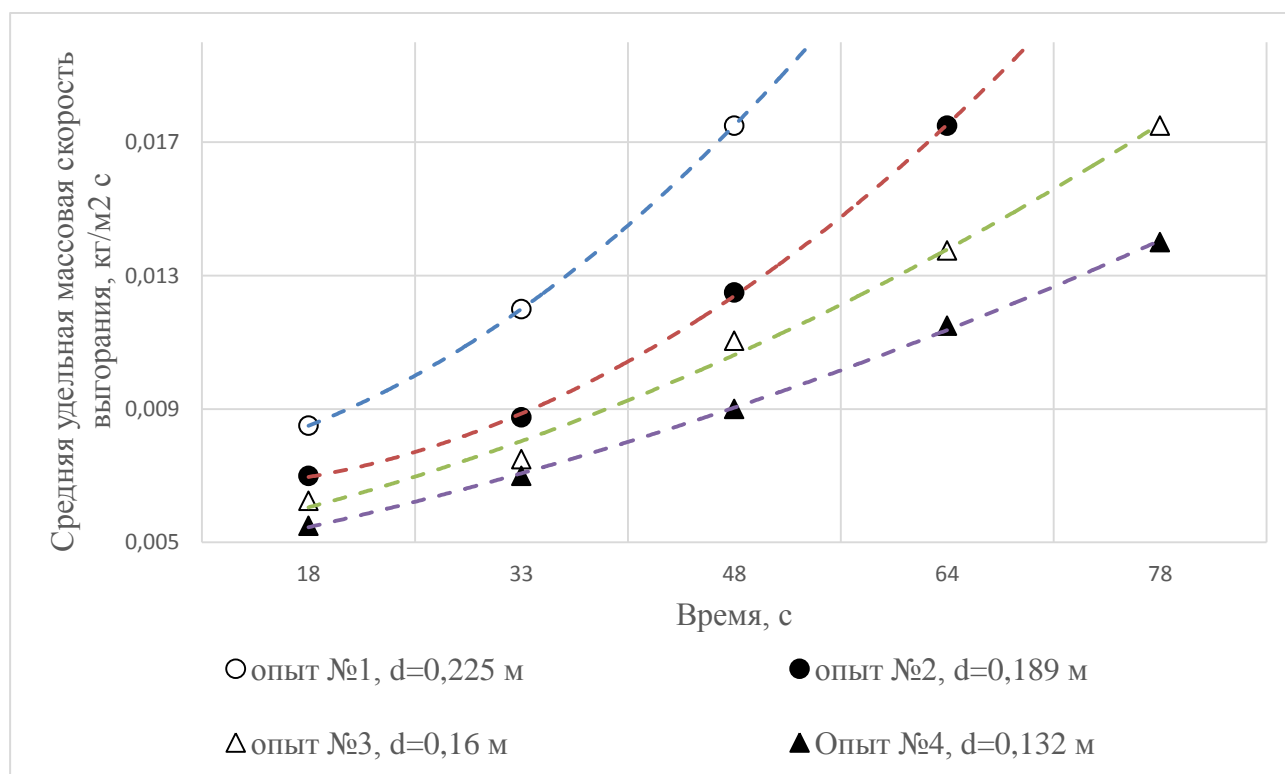


Рисунок 5.5 – Средняя удельная массовая скорость выгорания авиационного бензина в зависимости от времени для физической модели помещения при различных диаметрах поддона

Экспериментальные исследования динамики удельной массовой скорости выгорания горючей жидкости проводилось и на физической модели помещения, которая имела следующие геометрические размеры: длина 3,68 м, ширина 0,48 м, высота 0,5 м [40]. Модель выполнена из листовой стали, в потолочной части модели располагались отверстия, имитирующие вентиляционные короба. В модели выполнены два оконных проема общей площадью 0,2 % от площади пола. В качестве горючей жидкости применялся авиационный бензин в металлических поддонах различных диаметров. Для физической модели помещения полученные экспериментальные кривые изменения средней удельной массовой скорости выгорания авиационного

бензина в зависимости от времени при различных значения диаметра поддона представлены на рисунке 5.5.

Анализ представленных кривых показывает, что на интервале времени от 10 до 80 секунд процесс выгорания авиационного бензина также является неустановившимся для различных значений диаметра поддона с горючей жидкостью. При этом с возрастанием диаметра поддона пропорционально возрастала удельная массовая скорость выгорания жидкости.

Динамика удельной массовой скорости выгорания жидкости в помещении исследовалась и в зарубежных работах, в частности [164]. В экспериментальных исследованиях использовалось прямоугольное помещение с геометрическими размерами: длина 30 м, ширина 24 м, высота 26,3 м; площадь горения метилового спирта в поддоне составила 3,075 м². Полученная экспериментальная зависимость представлена на рисунке 5.6.

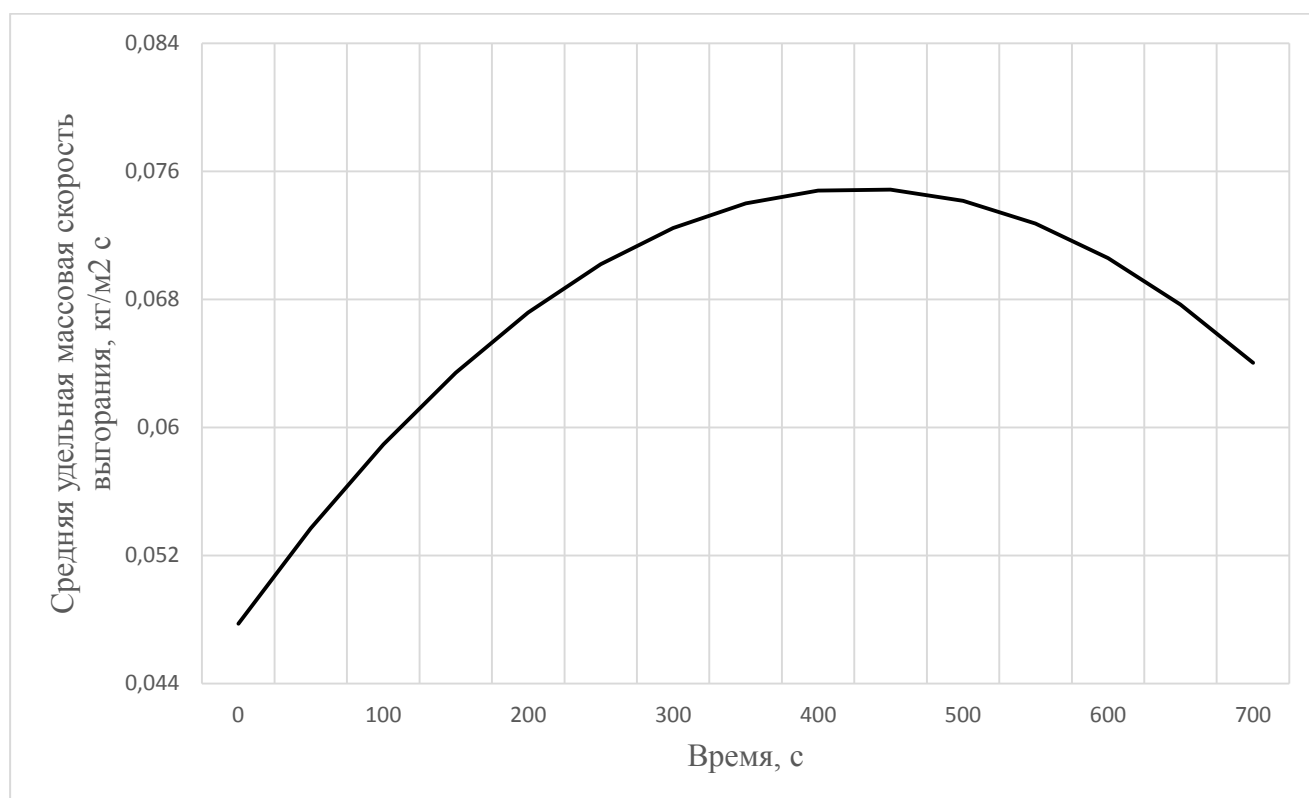


Рисунок 5.6 – Средняя удельная массовая скорость выгорания метилового спирта в зависимости от времени в натурном помещении

Опираясь на полученные экспериментальные данные, предложено следующее регрессионное уравнение

$$\psi_{y0} = 0,047731 + 0,126764 \cdot (\tau \cdot 10^{-3}) - 0,147801 \cdot (\tau \cdot 10^{-3})^2. \quad (5.28)$$

В представленном равенстве учитывается лишь время горения, хотя анализ экспериментальных данных работ [6, 40, 46, 117] позволяет сделать вывод, что удельная массовая скорость выгорания жидкости и время стабилизации процесса горения зависят, в частности, от физико-химических свойств горючей жидкости, площади очага горения, концентрации кислорода в газовой среде помещения. При этом согласно уравнению (5.4) концентрация кислорода в помещении зависит от процесса газообмена между помещением с очагом возгорания и внешней средой, следовательно, от этого процесса будет зависеть и динамика удельной массовой скорости выгорания жидкости.

5.3. Численное моделирование пожара с учетом работы системы противодымной вытяжной вентиляции

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 Ю.А. Кошмарова [41], согласно разработанной интегральной математической модели (5.1) – (5.15), учитывающей работу системы противодымной вытяжной вентиляции.

В ходе выполнения численного эксперимента варьировались следующие параметры, влияющие на протекание физических процессов при пожаре:

- среднемассовая температура газовой среды;
- средняя по объему плотность газовой среды;
- средние по объему парциальные 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 систему противодымной вытяжной вентиляции;

- удельная массовая скорость выгорания жидкости;
- вид функции режима пожара.

Исходные данные для проведения численных вычислений представлены в таблице 5.1. При этом в процессе вычислений учитывалось наличие открытого оконного проема в стене, то есть помещение негерметично, физико-химические показатели горючей жидкости (этиловый спирт) приняты в соответствии с [41].

Таблица 5.1 – Исходные данные

№ п/п	Наименование величины	Значение
1	Размеры помещения, м:	
	– длина	30
	– ширина	24
2	– высота	26
	Параметры проема, м:	
	– ширина	0,5
3	– расстояние от уровня пола до нижнего края	3
	– расстояние от уровня пола до верхнего края	4
3	Скорость потока газовой среды (продуктов горения) в системе противодымной вытяжной вентиляции, м/с	6(42)
4	Время включения системы противодымной вытяжной вентиляции, с	90
5	Время стабилизации процесса горения, с	100
6	Площадь очага пожара, м ²	3,075
7	Физико-химические показатели горючей жидкости:	
	– установившаяся удельная массовая скорость выгорания, кг/(м ² ·с)	0,031
	– дымообразующая способность, Нп·м ² /кг	80
	– количество кислорода, потребляемого на горение, кг/кг	2,362
	– низшая теплота сгорания, МДж/кг	27,5
	– количество монооксида углерода, выделяемого при горении, кг/кг	0,269
	– количество диоксида углерода, выделяемого при горении, кг/кг	1,937

Результаты численных вычислений систематизированы, для этой цели численный эксперимент разбит на серии, для которых используются равенства

указаны в таблице 5.2.

Таблица 5.2

№ серии	Интегральная математическая модель пожара	Удельная массовая скорость выгорания жидкости
1	модель Ю. А. Кошмарова [41]	$\psi_{y\partial} = K\psi_{y\partial}^0 - (1 - K) \frac{0,23(G_a + G_{ex})}{L_{O_2} \cdot S_f}$
2	уточненная модель (5.1 – 5.15)	
3	модель Ю. А. Кошмарова [41]	$\psi = \begin{cases} \psi_{y\partial} \cdot \sqrt{\tau/\tau_*}, & \text{при } \tau \leq \tau_*; \\ \psi_{y\partial}, & \text{при } \tau > \tau_*, \end{cases}$
4		$\psi_{y\partial} = \begin{cases} \psi_{y\partial}^0 \cdot (0,3 + 0,7\sqrt{\tau/\tau_*}), & \text{при } \tau \leq \tau_*; \\ \psi_{y\partial}^0, & \text{при } \tau > \tau_*, \end{cases}$

Отметим, что выражение (5.21) для удельной массовой скорости выгорания не позволяет учесть начало затухания пожара в момент достижения предельного значения для массовой доли кислорода. Поэтому по истечении некоторого промежутка времени могут наблюдаться расхождения результатов численного эксперимента с реальными.

На рисунках 5.7 – 5.13 показаны результаты численных вычислений изменения некоторых параметров пожара в соответствии с сериями 1-4.

На рисунках 5.7 и 5.8 представлены графики изменения средних по объему плотности газовой среды в целом и парциальной плотности кислорода этой среды в зависимости от времени горения с учетом работы системы противодымной вытяжной вентиляции. Наблюдаемое расхождение результатов вычислений, выполненных по зависимостям 1 и 2 серии, объясняется тем, что в первые 90 с развития пожара система противодымной вытяжной вентиляции 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 5.2. Согласно полученным данным за первые 190 с

развития пожара уменьшение общей массы кислорода в газовой среде достигает 9 %.

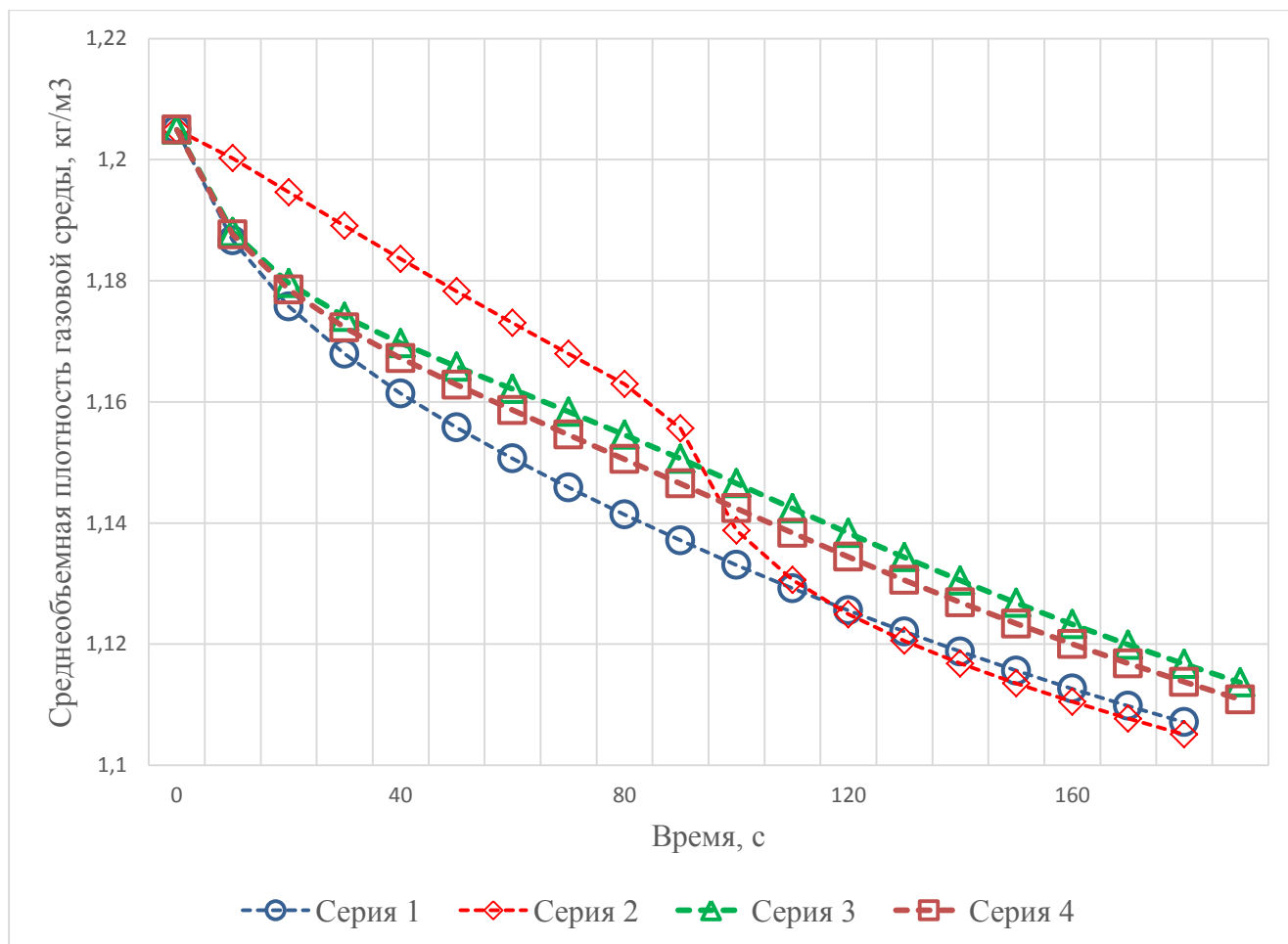


Рисунок 5.7 – Средняя по объему плотность газовой среды от времени

На рисунке 5.9 показаны графики изменения массовой доли кислорода в газовой среде в соответствии с зависимостями таблицы 5.2. Анализ численных результатов показывает, что в первые 190 с развития пожара массовая доля кислорода в газовой среде по сравнению с первоначальным значением уменьшается весьма незначительно: для серий 1 и 2 – от 0,231 до 0,229; для серий 3 и 4 – от 0,231 до 0,230. То есть среднее изменение массовой доли кислорода составляет менее 1%. Это объясняется тем, что с уменьшением среднеобъемной парциальной плотности кислорода в целом уменьшается и средняя по объему плотность газовой среды.

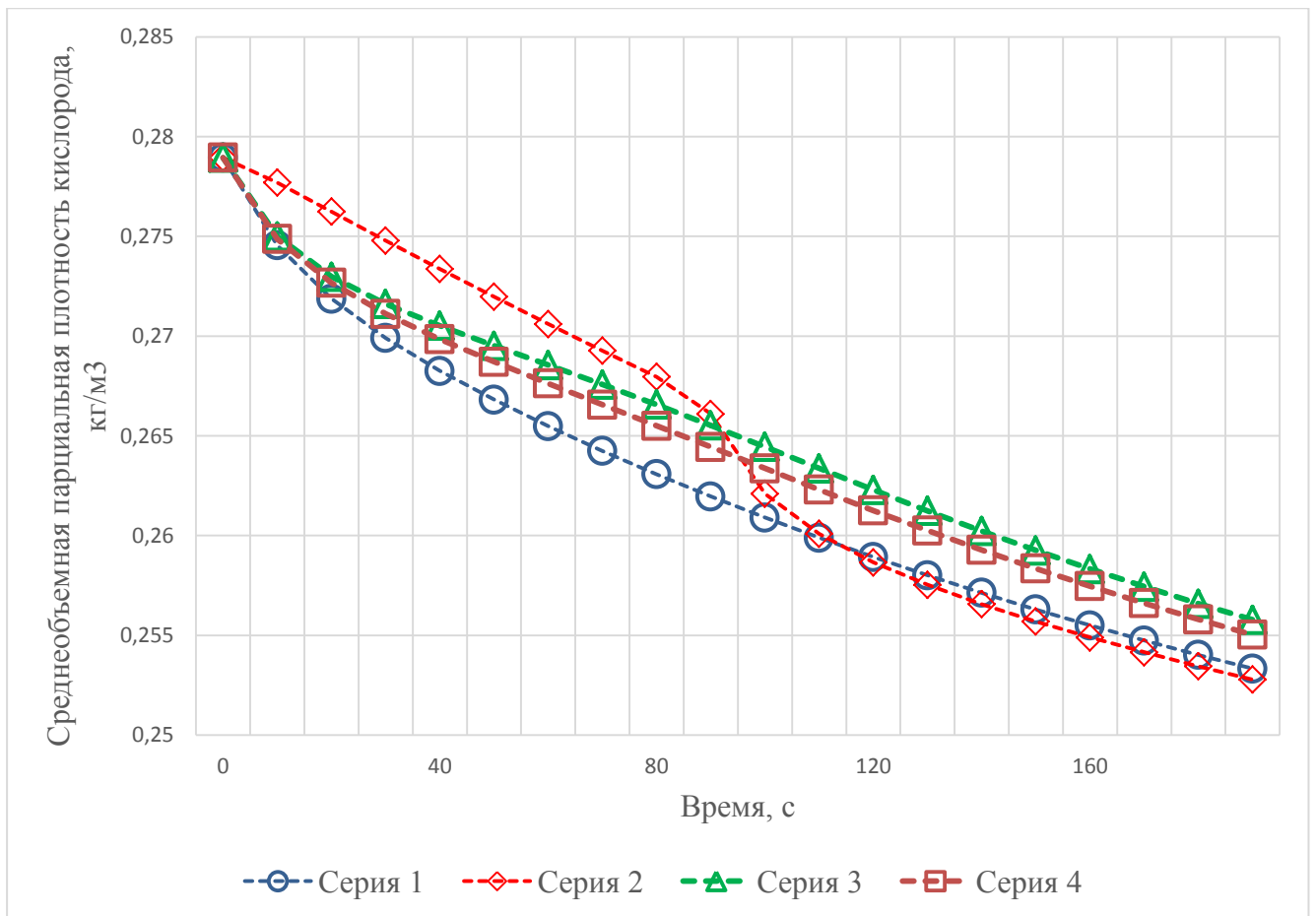


Рисунок 5.8 – Средняя по объему парциальная плотность кислорода от времени

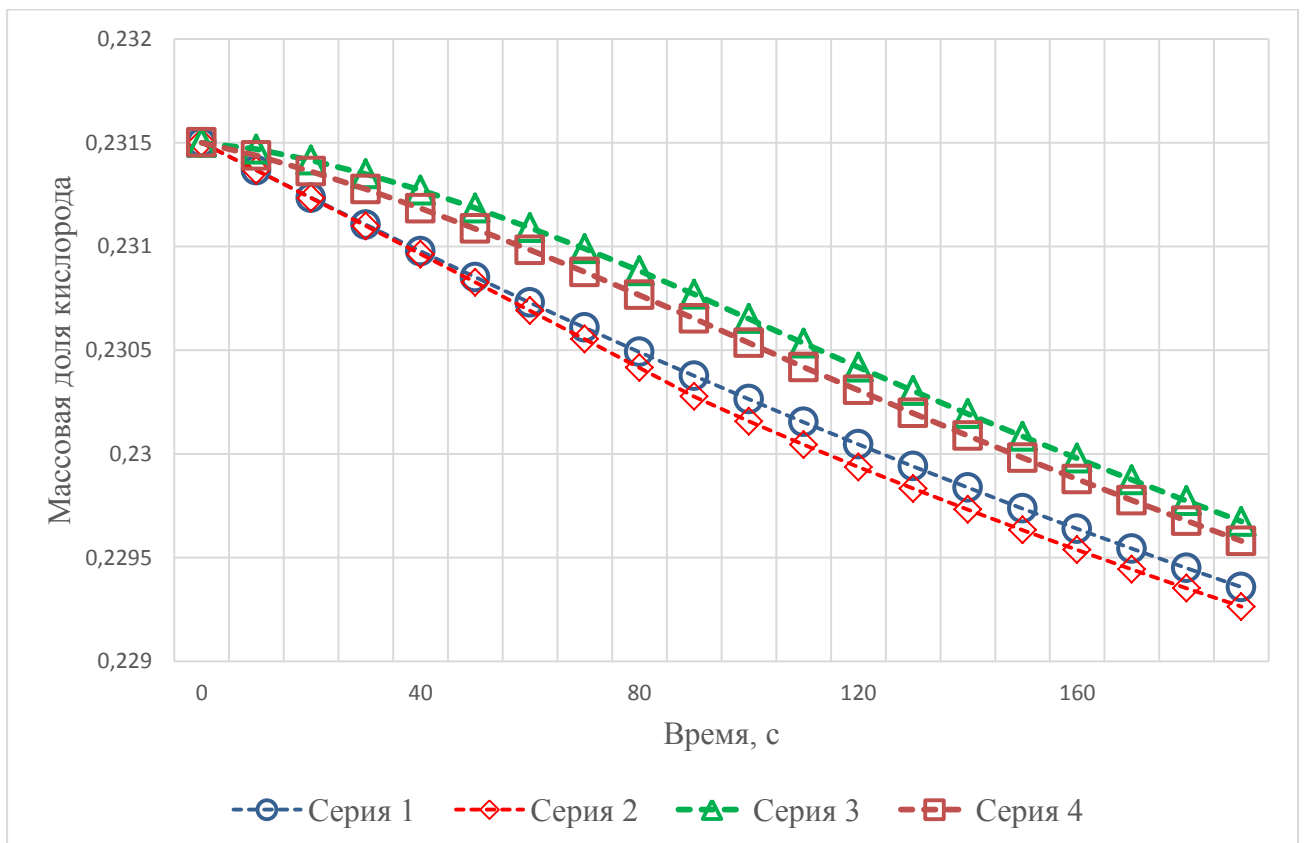


Рисунок 5.9 – Массовая доля кислорода в газовой среде

Как указывалось выше, выгорание кислорода в газовой среде влияет на удельную массовую скорость выгорания и учитывается с помощью функции режима пожара (5.24). В начальной стадии развития пожара имеет место граничный режим, регулируемый нагрузкой. При этом функция режима пожара практически не меняется и приближенно равна единице, что подтверждается результатами численных вычислений.

На рисунке 5.10 показаны графические зависимости изменения удельной массовой скорости выгорания этилового спирта в зависимости от времени в соответствии с сериями 1 – 4.

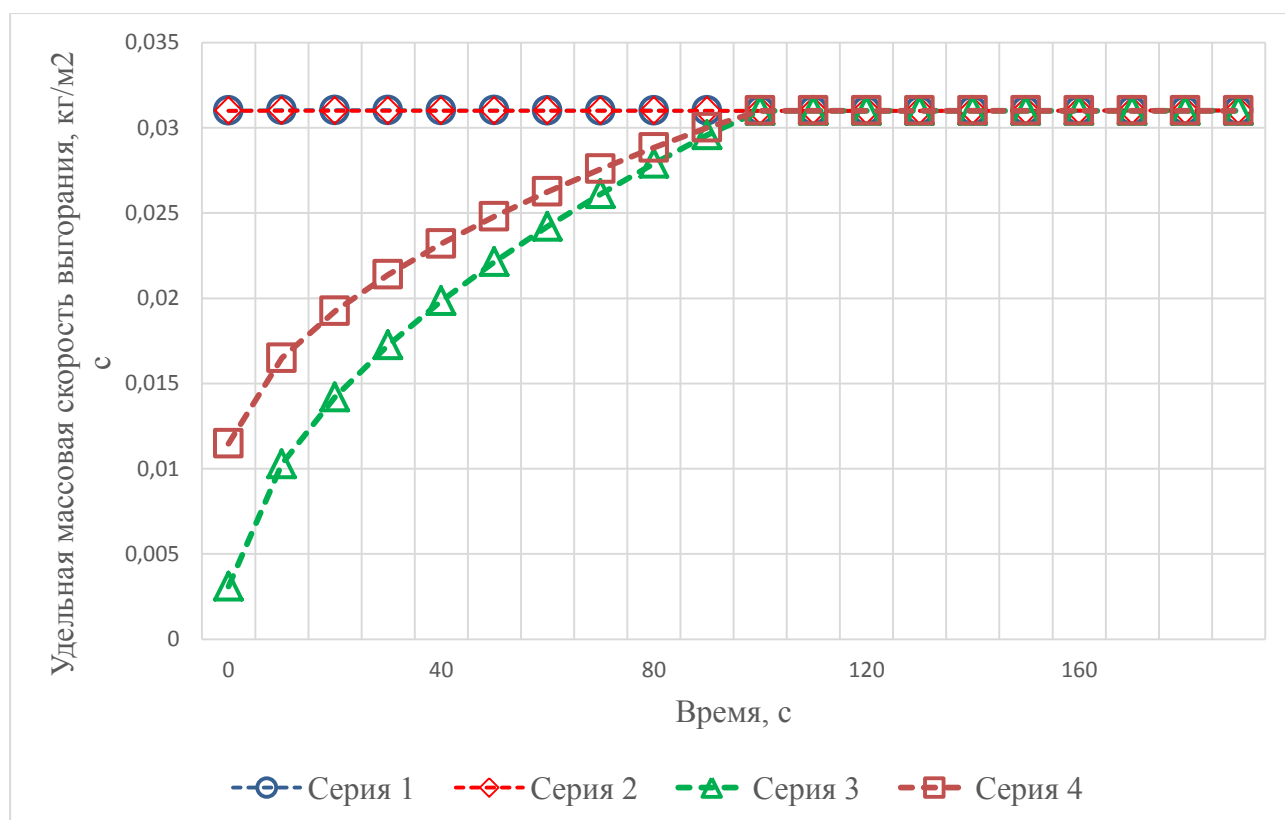


Рисунок 5.10 – Удельная массовая скорость выгорания этилового спирта

Анализ графиков показывает, что время включения и объемный расход системы противодымной вытяжной вентиляции практически не оказывают влияние на динамику удельной массовой скорости выгорания этилового спирта, что находится в некотором противоречии с протекающими при этом физическими явлениями. Следовательно, применяемое в численных расчетах равенство (5.21) не отражает в достаточной мере влияние на динамику

удельной массовой скорости выгорания жидкости уменьшение количества кислорода в газовой среде, и в этом направлении требуются дополнительные экспериментальные исследования.

Графики рисунка 5.10 показывают, что аналитические зависимости серий 3 и 4, в отличие от 1 и 2, описывают стадию стабилизации горения, для которой, согласно полученным данным, промежуток времени составил 100 с. Чтобы применить полуэмпирические зависимости (5.25), (5.26) 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.

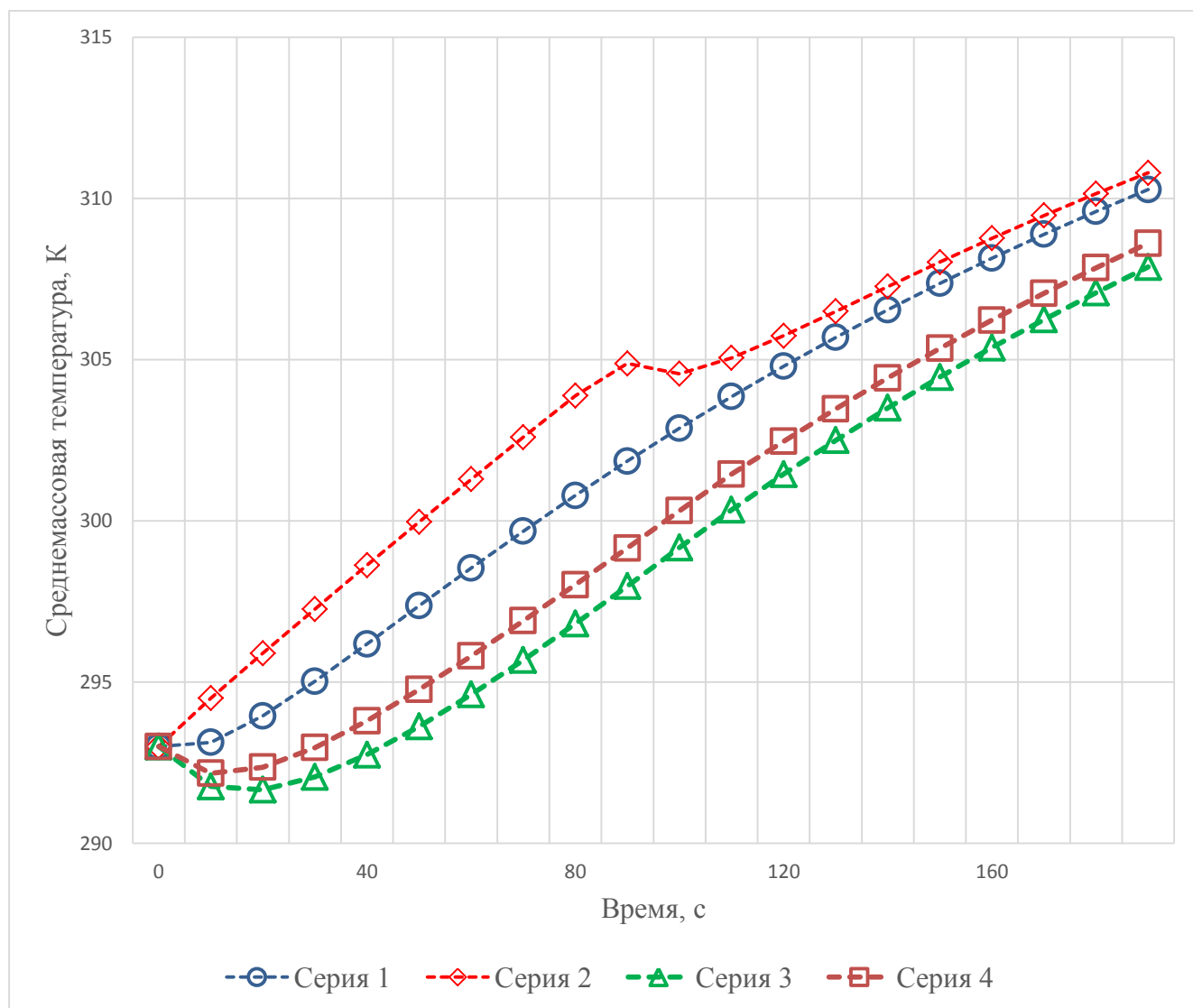


Рисунок 5.11 – Среднемаассовая температура газовой среды

На рисунках 5.11 – 5.13 представлены графики изменения среднемассовой температуры, среднеобъемной парциальной плотности монооксида и диоксида углерода в газовой среде.

На рисунке 5.11 различие графиков 1 и 2 серии объясняется тем, что в первые 90 с развития пожара система противодымной вытяжной вентиляции не работала. На всех графиках имеет место отличие численных результатов, полученных по сериям 1,2 и 3,4. Это связано с использованием в расчетах разных математических зависимостей для удельной массовой скорости выгорания жидкости. При этом в этих зависимостях не учитывается неустановившийся процесс горения, который имеет место в начальной стадии развития пожара. Так как сразу предполагается установившееся значение, то скорость нарастания опасных факторов пожара будет несколько завышена.

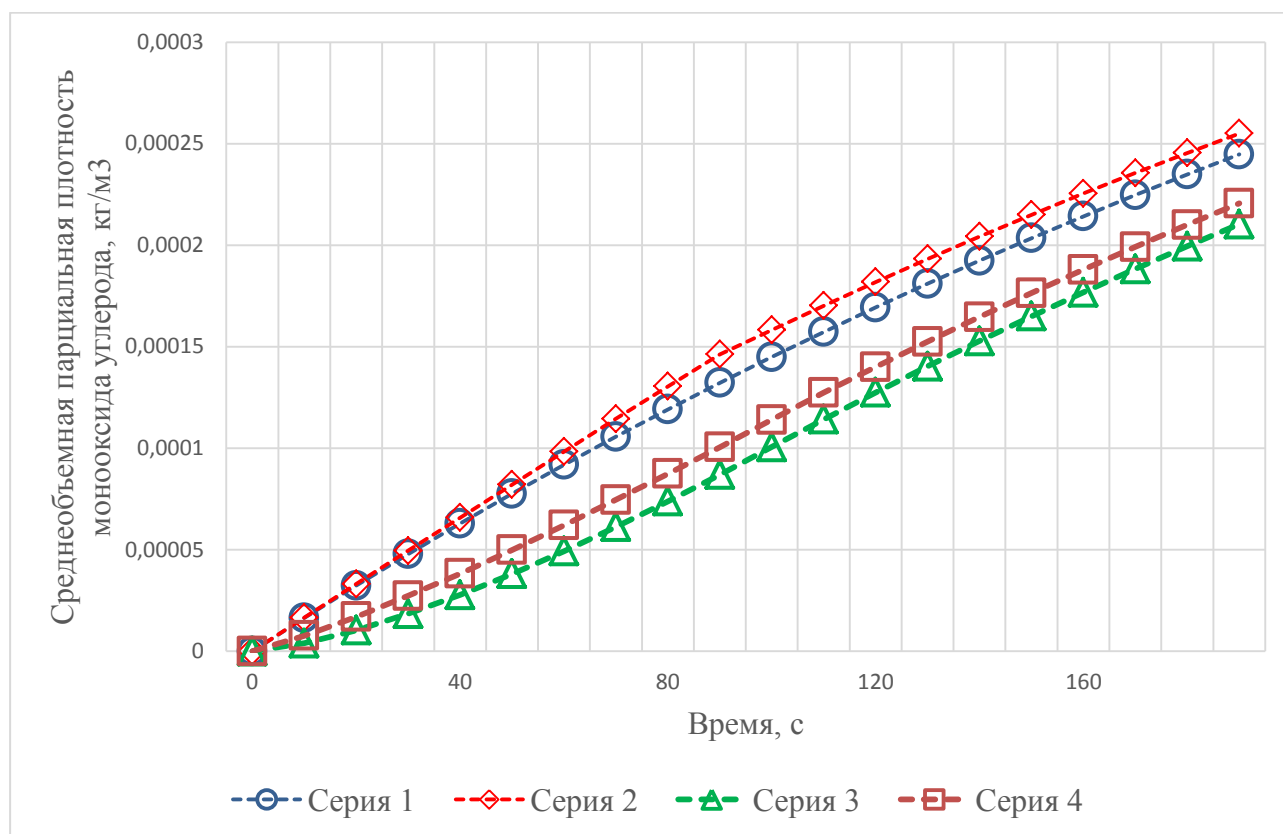


Рисунок 5.12 – Средняя по объему парциальная плотность монооксида углерода газовой среды

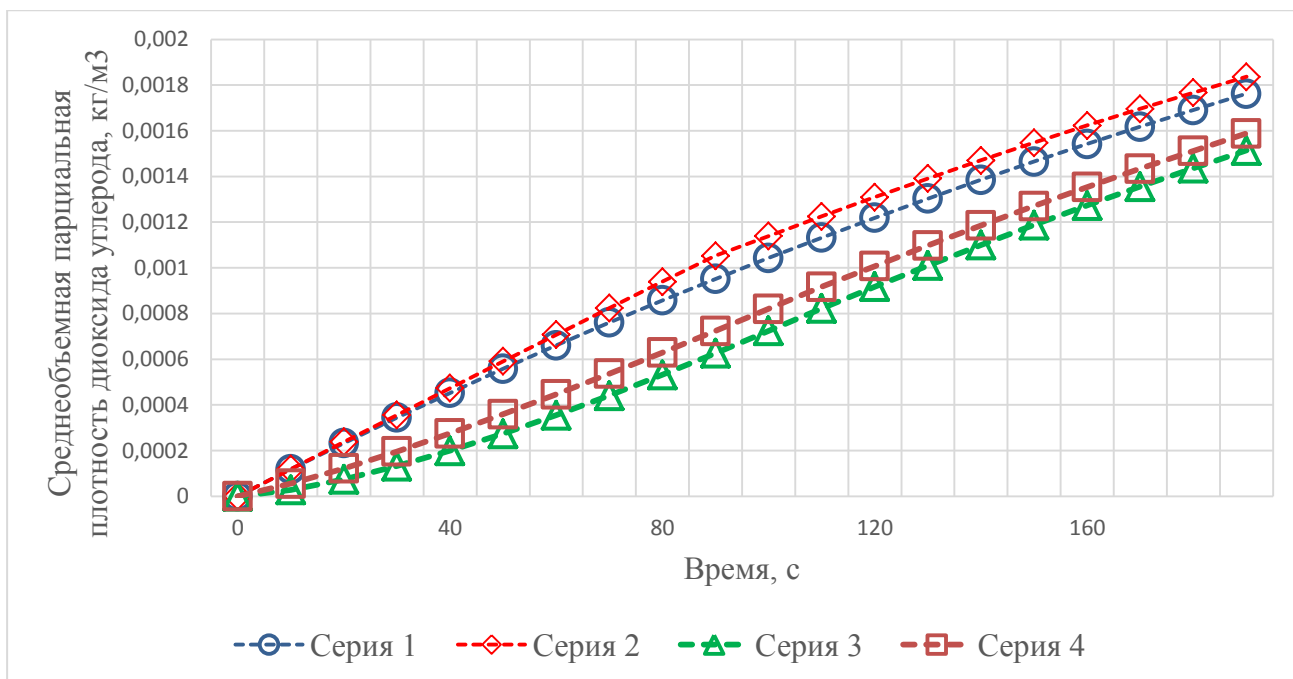


Рисунок 5.13 – Среднеобъемная парциальная плотность диоксида углерода газовой среды

5.4. Определение основных параметров противодымной вентиляции в помещении с очагом возгорания

Для успешного решения проблемы защиты зданий, как вновь возводимых, так уже эксплуатируемых, необходима методика расчета параметров приточно-вытяжной вентиляции, обеспечивающей удаление продуктов горения при пожаре в здании из помещений с очагом возгорания и смежных с ним. При этом к основным параметрам противодымной вентиляции следует отнести температуру и массовый расход продуктов горения, удаляемых с помощью этой вентиляции. Один из вариантов такой методики предложен в [56]. В данном и следующем разделах в аналогичной последовательности изложено получение данных, необходимых для расчета приточно-вытяжной противодымной вентиляции различных зданий и сооружений, но с использованием некоторых исходных аналитических зависимостей и вычисляемых из них величин, полученных в главе 4.

По аналогии с представленным в главе 4 уравнением (4.2) материального баланса для газовой среды в помещении, можно записать уравнение,

описывающее массовый расход продуктов горения, которые удаляются из горящего помещения:

$$\frac{d(\rho_m^\delta V^\delta)}{d\tau} = \psi - G_m^\delta, \quad (5.29)$$

где V^δ (м³) – объем, занимаемый в помещении слоем дыма;

ρ_m^δ (кг/м³) – средняя плотность в слое дыма, концентрирующегося в верхней части помещения с очагом возгорания;

$\rho_m^\delta V^\delta$ (кг) – соответственно масса газа, заполняющего дымовой слой;

τ (с) – время;

ψ (кг/с) – скорость выгорания (количество сгорающего за единицу времени горючего материала);

G_m^δ (кг/с) – массовый расход удаляемых продуктов горения.

На начальной стадии пожара среднее давление среды практически не меняется и равно давлению наружного воздуха. Следовательно, уравнение состояния газа имеет вид

$$\rho_m^\delta T_m^\delta = \rho_0 T_0 = const, \quad (5.30)$$

где ρ_0, T_0 – плотность и температура среды до начала пожара;

T_{cp}^δ – средняя температура дымового слоя, определяемая формулой (4.29).

Приведенные уравнения (5.29), (5.30) замыкаются функциональной зависимостью количества сгорающего за единицу времени горючего материала с мощностью $Q_{пож}$ тепловыделения очага пожара и толщиной h дымового слоя

$$\psi = f(Q_{пож}, h), \quad (5.31)$$

где $Q_{пож}$ определяется выражением [41]

$$Q_{пож} = \eta \psi_{уд} Q_n^p F_{пож}. \quad (5.32)$$

Здесь η – коэффициент полноты сгорания;

Q_n^p (Дж/кг) – теплота сгорания;

$\psi_{уд}$ (кг/м²·с) – удельная массовая скорость выгорания;

$F_{пож}$ (м²) – площадь горения пожарной нагрузки.

Функциональная зависимость (5.31) определяет содержание и порядок расчета противодымной вентиляции с учетом конфигурации конкретных помещений.

Для помещений с массовым пребыванием людей (зрительных и торговых залов, залов для проведения конференций и спортивных мероприятий и т.д.), а также для атриумов с конструктивно неотделенными галереями (рисунок 5.14) зависимость (5.31) принимается в виде [135]:

$$\psi = 0,071\sqrt[3]{\alpha Q_{пож} \cdot (H - h)^5} + 0,0018\alpha Q_{пож}, \quad (5.33)$$

где α – коэффициент теплопотерь на излучение;

H (м) – полная высота помещения с очагом возгорания;

h (м) – толщина слоя дыма, образующегося при пожаре в верхней части помещения.

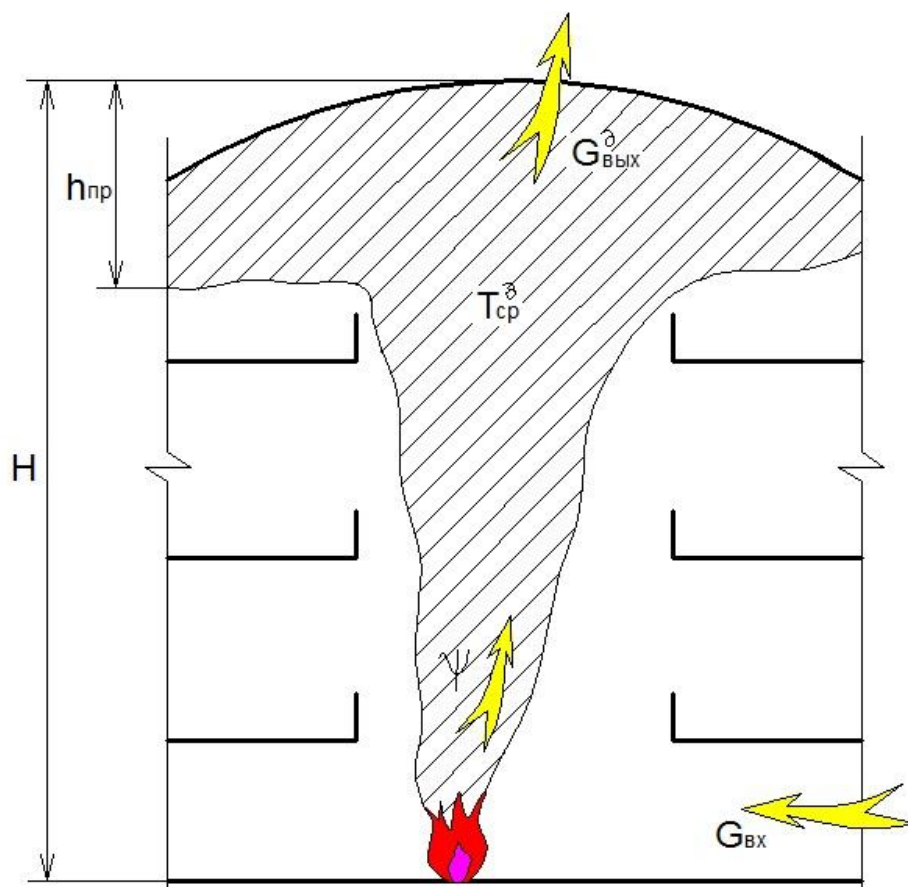


Рис. 5.14 – Заполнение дымом атриумов с конструктивно неотделенными галереями

В случае, если атриум содержит конструктивно отделенные этажи (рисунок 5.15), функциональная зависимость (5.31) выбирается в следующем виде [135]:

$$\psi = 0,032\sqrt[3]{(\alpha Q_{\text{пож}})^5 (H - h)}. \quad (5.34)$$

Если расчет основных параметров вытяжной вентиляции, удаляющей дым из помещения, проводится, исходя из условия защиты только на период эвакуации людей из горящего здания, то должны выполняться условия

$$0 \leq \tau \leq \tau_{\text{кр}}, \quad 0 \leq h \leq h_{\text{пр}}, \quad (5.35)$$

где $\tau_{\text{кр}}$ – критическое время эвакуации людей из горящего здания;

$h_{\text{пр}}$ – предельная толщина слоя дыма, при которой еще имеется относительно прозрачная воздушная среда, допускающая эвакуацию людей из помещения горящего здания вдоль горизонтальных путей.

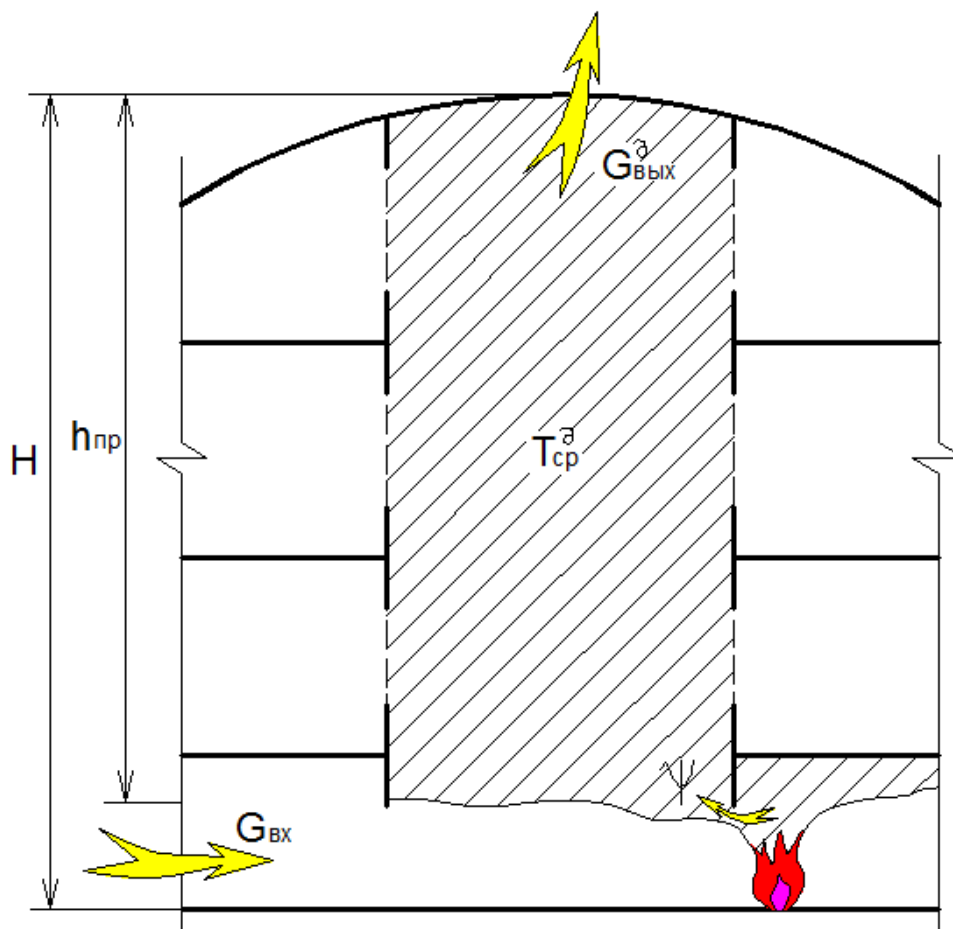


Рис. 5.15 – Заполнение дымом атриумов с конструктивно отделенными галереями

Если расчет основных параметров вытяжной вентиляции, удаляющей дым из помещения, проводится, исходя из условия защиты на время, которое необходимо для проведения противопожарных мероприятий специализированными подразделениями, то должны выполняться условия

$$0 \leq \tau \leq \tau_{\text{сп}}, \quad 0 \leq h \leq h_{\text{пр}}, \quad (5.36)$$

где $\tau_{\text{сп}}$ – время окончания спасательных работ.

В первом случае $G_m^{\text{д}} < \psi$, и для расчета параметров вытяжной вентиляции требуется интегрирование уравнения (5.29). Во втором случае $G_m^{\text{д}} = \psi$, интегрирование уравнения (5.29) для расчета параметров вытяжной вентиляции не требуется.

5.5. Определение основных параметров противодымной вентиляции в помещениях, смежных с содержащим очаг возгорания

Расчет параметров системы вытяжной вентиляции, удаляющей дым с токсичными продуктами горения из смежных с горящим помещений, должен проводиться в зависимости от режима горения материала.

Как указывалось выше, согласно [41] имеют место два предельных режима горения горючей нагрузки в помещении. Если имеется достаточное количество кислорода, то горение материала в помещении происходит аналогично его горению на открытом воздухе. В этом случае реализуется режим пожара, регулируемый нагрузкой (ПРН). Если кислорода в помещении недостаточно, то скорость выгорания определяется количеством воздуха, поступающего извне. В этом случае реализуется режим пожара, регулируемый вентиляцией (ПРВ). На практике в процессе развития пожара эти предельные режимы могут чередоваться, между ними имеют место промежуточные состояния.

Согласно [59] режим пожара можно определить, сравнивая приведенную удельную пожарную нагрузку $g_{\text{уд}}$ с ее критическим значением $g_{\text{кр}}$. Если $g_{\text{уд}} < g_{\text{кр}}$, то имеет место пожар, регулируемый нагрузкой (ПРН); если $g_{\text{уд}} > g_{\text{кр}}$, то

имеет место пожар, регулируемый вентиляцией (ПРВ). При этом $g_{уд}$ и $g_{кр}$ определяются соответственно выражениями:

$$g_{уд} = \frac{\sum m_j Q_{Hj}^p}{(F_{общ} - A_{общ}) Q_{нд}^p}; \quad (5.37)$$

$$g_{кр} = \frac{\sqrt[3]{V}}{6V_B} + \frac{4500\Pi^3}{1+500\Pi^3}. \quad (5.38)$$

Здесь

m_j (кг) – количество j -го материала, входящего в состав пожарной нагрузки;

Q_{Hj}^p (кДж/кг) – теплота сгорания для j -го материала;

$F_{общ}$ (м²) – общая площадь ограждающих помещение стен, пола и потолка;

$A_{общ}$ (м²) – общая площадь проемов в помещении;

$Q_{нд}^p$ (кДж/кг) – теплота сгорания для древесины;

V (м³) – объем всего помещения;

V_B (м³/кг) – удельное количество воздуха, которое необходимо для полного сгорания находящихся в помещении горючих материалов, $V_B = 0,263 \cdot 10^{-3} \cdot \sum m_j Q_{Hj}^p$;

Π (м^{1/2}) – проемность помещения, определяемая равенством $\Pi = \frac{\sum A_j \sqrt{h_j}}{\sqrt[3]{V^2}}$;

A_j (м²) – площадь j -го проема в помещении;

h_j (м) – высота j -го проема в помещении.

Общую площадь поверхности строительных конструкций, которые ограждают помещение, вычисляют по формуле $F_{общ} = 6V^{2/3}$. Значения Q_{Hj}^p и $Q_{нд}^p$ можно взять из справочных данных, которые приведены в [41].

Если в горящем помещении имеет место режим ПРН, то максимальное значение среднеобъемной температуры T_{max} в нем определяется из выражения [58]

$$T_{max} = T_0 + 224g_{кр}^{0,528}, \quad (5.39)$$

где T_0 (К) – температура воздуха.

Если в горящем помещении имеет место режим ПРВ, то [58]

$$T_{max} = T_0 + 940 \cdot e^{(0,0047g_{уд}^n - 0,141)}, \quad (5.40)$$

где приведенная удельная пожарная нагрузка $g_{уд}^п = \frac{\sum m_j Q_{Hj}^п}{F_{п} Q_{HD}^п}$ относится не ко всей площади ограждающих конструкций, а только к площади пола помещения – $F_{п}$ (m^2).

Зависимости (5.39), (5.40) необходимы для определения параметров вентиляции, удаляющей дым из рассматриваемых помещений.

На рисунке 5.16 показана схема обмена газами в коридоре этажа, на котором находится помещение с очагом возгорания. Температура газов, выходящих из горящего помещения в коридор, определяется соотношением [58]:

$$T_{вых} = 0,8T_{max}. \quad (5.41)$$

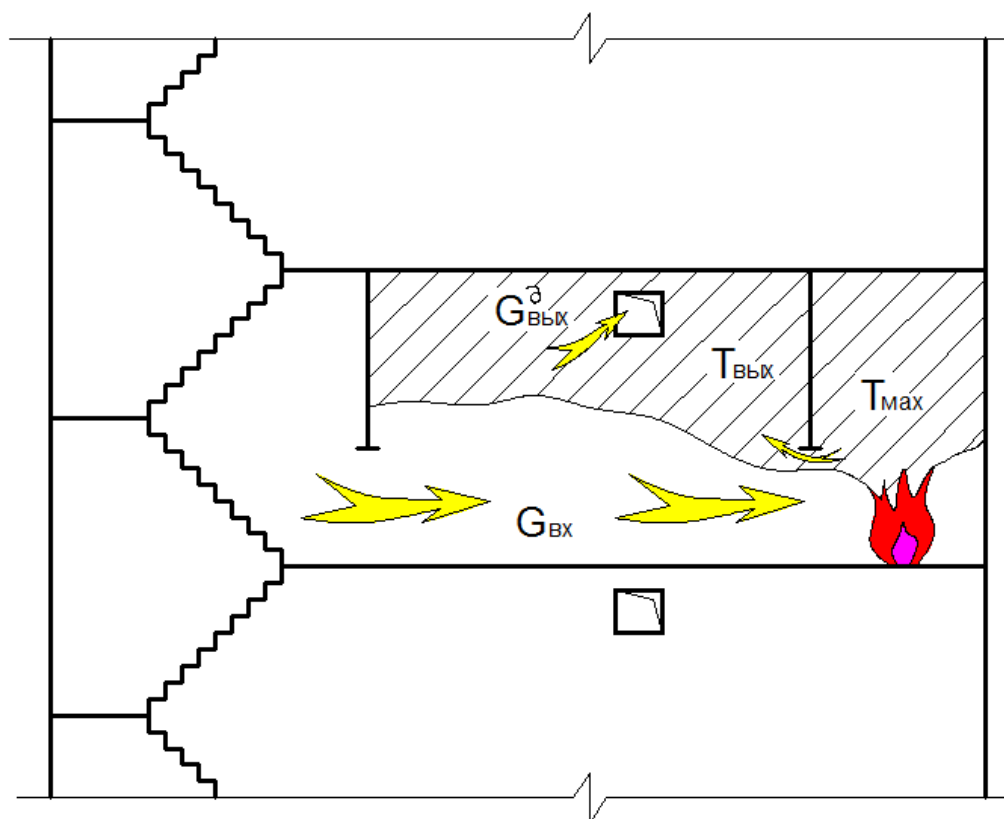


Рисунок 5.16 – Воздухообмен на этаже с очагом возгорания

В работе [110] приводится дифференциальное уравнение, отражающее характер распределения температуры в слое дыма вдоль длины коридора.

Интегрирование этого уравнения позволяет получить выражение для усредненной температуры дымовой завесы в коридоре

$$T_{\text{ср}} = T_0 + 1,22 \frac{(T_{\text{вых}} - T_0)(2h_{\text{пр}} + A_{\text{к}}/l_{\text{к}})}{l_{\text{к}}} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{0,58l_{\text{к}}}{2h_{\text{пр}} + A_{\text{к}}/l_{\text{к}}}\right) \right], \quad (5.42)$$

где $h_{\text{пр}}$ (м) – предельное значение толщины дымового слоя;

$A_{\text{к}}$ (м²), $l_{\text{к}}$ (м) – площадь и длина коридора соответственно.

При этом отношение предельной толщины дымового слоя к полной высоте коридора должно лежать в интервале от 0,5 до 0,6.

Массовый расход дыма, удаляемого из коридора при пожаре в одном из соединяющихся с ним помещений, определяется по формуле [67, 68]:

$$G_{\text{вых}}^{\text{д}} = kA_{\text{дв}}\sqrt{h_{\text{дв}}}, \quad (5.43)$$

где

коэффициент k принимает значения 1,0 и 1,2 для жилых и общественных зданий соответственно;

$A_{\text{дв}}$, $h_{\text{дв}}$ – площадь и высота двери соответственно на выходе из коридора по пути эвакуации.

С помощью зависимостей (5.42), (5.43) можно определять параметры вытяжной вентиляции для удаления дыма из смежных с горящим помещением одноуровневых холлов, вестибюлей и т.д. Если вестибюль, торговый зал или атриум сообщается с двумя и более уровнями, на которых расположены помещения различной площади, то для определения удаляемого массового расхода дыма при пожаре можно воспользоваться представленной в [135] зависимостью

$$G_{\text{вых}}^{\text{д}} = 0,68 \sqrt[3]{A_{\text{пр}}h_{\text{пр}}^{1/2} \left(z_{\text{пр}} + 2,4A_{\text{пр}}^{2/5}h_{\text{пр}}^{1/5} - 2,1h_{\text{пр}} \right)^5} + 1,5A_{\text{пр}}\sqrt{h_{\text{пр}}}, \quad (5.44)$$

где

$A_{\text{пр}}$, $h_{\text{пр}}$ – площадь и высота соответственно проема помещения с очагом возгорания, смежного с защищаемым вестибюлем, торговым залом или атриумом;

$z_{\text{пр}}$ – расстояние от верха этого проема до нижней границы дымовой завесы.

При этом средняя температура дымового слоя определяется по представленной в главе 4 зависимости (4.29).

5.6. Выводы по пятой главе

1. В рамках выполненного теоретического исследования по влиянию работы системы противодымной вытяжной вентиляции на протекание физических явлений при пожаре представлена уточненная математическая модель пожара, учитывающая объемный расход и время включения этой вентиляции в условиях неустановившегося процесса выгорания жидкости. Базовыми являются уравнения энергетического и материального балансов, при этом газообмен происходит в двустороннем направлении через естественную вентиляцию, а через систему противодымной вытяжной вентиляции в одностороннем. Аналогично осуществляется процесс теплообмена, включая конвективную и радиационную составляющие, в ограждающие конструкции. В совокупности представленная разрешающая система дифференциальных уравнений позволяет рассчитать числовые значения для среднemasсовой температуры, среднеобъемных парциальных плотностей кислорода и токсичных газов (хлористый водород, монооксид и диоксид углерода в газовой среде), а также оптическое количество дыма.

2. На основе анализа применяемых на практике различных зависимостей для удельной массовой скорости выгорания жидкости сделан вывод о зависимости этого параметра от режима работы противодымной вытяжной вентиляции, в частности от объемного расхода и времени включения этой системы.

3. Проведен численный эксперимент по исследованию влияния режима работы системы противодымной вытяжной вентиляции, а также неустановившегося процесса горения жидкости на характер изменения основных параметров газовой среды. При этом аналитические зависимости для удельной массовой скорости выгорания жидкости могут содержать погрешности, если при их получении не учитывать неустановившийся процесс

горения жидкости, объемный расход и время включения системы противодымной вытяжной вентиляции. Как следствие, это приведет к переоценке или недооценке пожарной опасности строительного объекта в целом.

4. Представлены аналитические зависимости, позволяющие провести инженерные вычисления для определения исходных данных с последующим расчетом вентиляционной системы, обеспечивающей удаление продуктов горения из помещений горящего здания. При этом не требуется привлечения каких-либо программных комплексов ПЭВМ.

ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ УДЕЛЬНОЙ МАССОВОЙ СКОРОСТИ ВЫГОРАНИЯ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЖИДКОСТИ

6.1. Задачи экспериментального исследования и исходные параметры

В предыдущей главе диссертации предложена уточненная интегральная математическая модель пожара (5.1) – (5.15), описывающая изменение ОФП с учетом работы системы противодымной вытяжной вентиляции. Отмечено, что на характер изменения основных параметров газовой среды и протекающие при пожаре тепломассообменные процессы оказывает влияние удельная массовая скорость выгорания горючей нагрузки. В свою очередь, последняя зависит от режима работы противодымной вытяжной вентиляции, времени ее включения и объемного расхода. Для получения регрессионного уравнения, описывающего зависимость удельной массовой скорости выгорания твердых материалов и жидкости от объемного расхода системы противодымной вытяжной вентиляции и времени ее включения, необходимо проведение соответствующих экспериментальных исследований.

При постановке задач экспериментального исследования в качестве выходного параметра (отклика) выбрана удельная массовая скорость выгорания твердого материала, рассчитываемая по формуле (5.21) с использованием эмпирических зависимостей (5.22) или (5.24). В качестве входных параметров приняты: время горения (X_1 , с); время, через которое после начала пожара включается система противодымной вытяжной вентиляции (X_2 , с); объемный расход системы противодымной вытяжной вентиляции (X_3 , м³/с). Рассматриваемые факторы и принимаемые для них значения при экспериментальных исследованиях с твердым материалом представлены в таблице 6.1. Согласно данным таблицы при проведении эксперимента необходимо рассмотреть пять режимов работы системы противодымной вытяжной вентиляции.

Таблица 6.1 – Значения, принимаемые рассматриваемыми параметрами для
твёрдого материала

Параметры		Принимаемые значения					Шаг варьирования
Натуральный вид	Код параметра	-1,215	-1	0	1	1,215	
τ , с – время пожара	X_1	12,8	30	110	190	207,2	80
τ^* , с – время срабатывания вытяжной вентиляции	X_2	24	30	60	90	97	30
W_g , м ³ /с – объемный расход системы вытяжной вентиляции	X_3	0,014 Режим работы №1	0,016 Режим работы №2	0,024 Режим работы №3	0,031 Режим работы №4	0,033 Режим работы №5	0,008

В процессе контроля объемного расхода системы противодымной вытяжной вентиляции при каждом из режимов предварительно измерены скорости потока газовой среды этой системы с помощью анемометра. Для каждого из режимов было выполнено 12 измерений. Среднее значение и половина ширины доверительного интервала представлены в таблице 6.2. При этом для всех режимов работы уровень значимости принимался одинаковым и равным $\alpha = 0,05$.

Визуально в графическом виде представленные в таблице 6.2 данные для скоростей воздушных потоков, их средних значений и границ доверительных интервалов при различных режимах работы системы противодымной вытяжной вентиляции показаны на рисунках 6.1 – 6.5.

Таблица 6.2 – Среднее значение и половина ширины доверительных интервалов замеренных скоростей воздушного потока

Режим работы	Номер измерения	Скорость потока, м/с	Среднее значение, м/с	Половина доверительного интервала, м/с
Режим работы № 1	1	1.88	1,829	±0,035
	2	1.80		
	3	1.85		
	4	1.74		
	5	1.79		
	6	1.87		
	7	1.85		
	8	1.88		
	9	1.83		
	10	1.72		
	11	1.86		
	12	1.88		
Режим работы № 2	1	2.04	1,990	±0,039
	2	2.05		
	3	2.05		
	4	1.98		
	5	2.03		
	6	1.93		
	7	2.04		
	8	1.91		
	9	1.96		
	10	1.91		
	11	1.92		
	12	2.06		
Режим работы № 3	1	3.06	3,004	±0,051
	2	2.95		
	3	3.14		
	4	2.86		
	5	2.98		
	6	2.96		
	7	3.08		
	8	3.09		
	9	2.91		

Режим работы	Номер измерения	Скорость потока, м/с	Среднее значение, м/с	Половина доверительного интервала, м/с
	10	3.00		
	11	2.98		
	12	3.04		
Режим работы № 4	1	4.08	4,00	±0,067
	2	4.10		
	3	3.91		
	4	4.07		
	5	4.06		
	6	3.87		
	7	3.85		
	8	4.00		
	9	4.18		
	10	3.94		
	11	4.03		
	12	3.89		
Режим работы № 5	1	4.31	4,21	±0,08
	2	4.10		
	3	4.20		
	4	4.28		
	5	4.36		
	6	4.39		
	7	4.22		
	8	4.05		
	9	4.05		
	10	4.10		
	11	4.34		
	12	4.10		

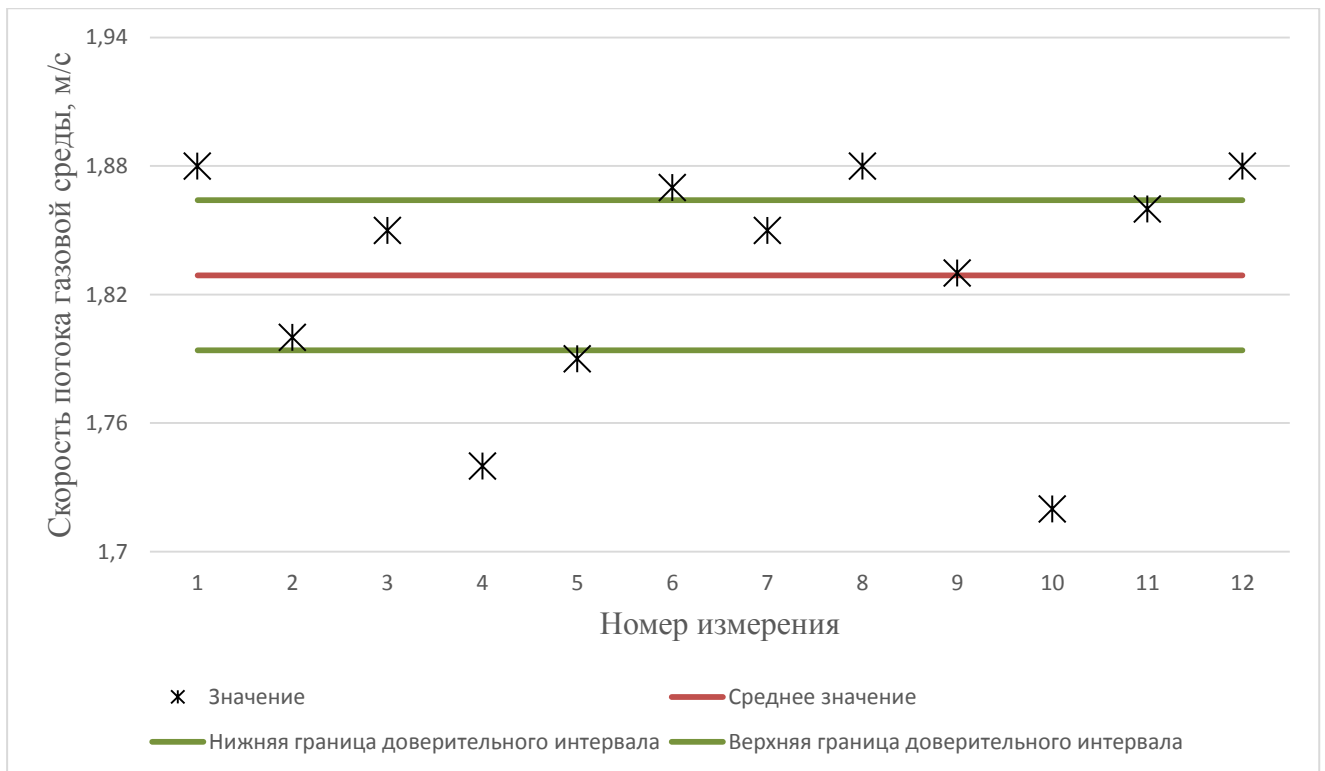


Рисунок 6.1 – Режим работы № 1

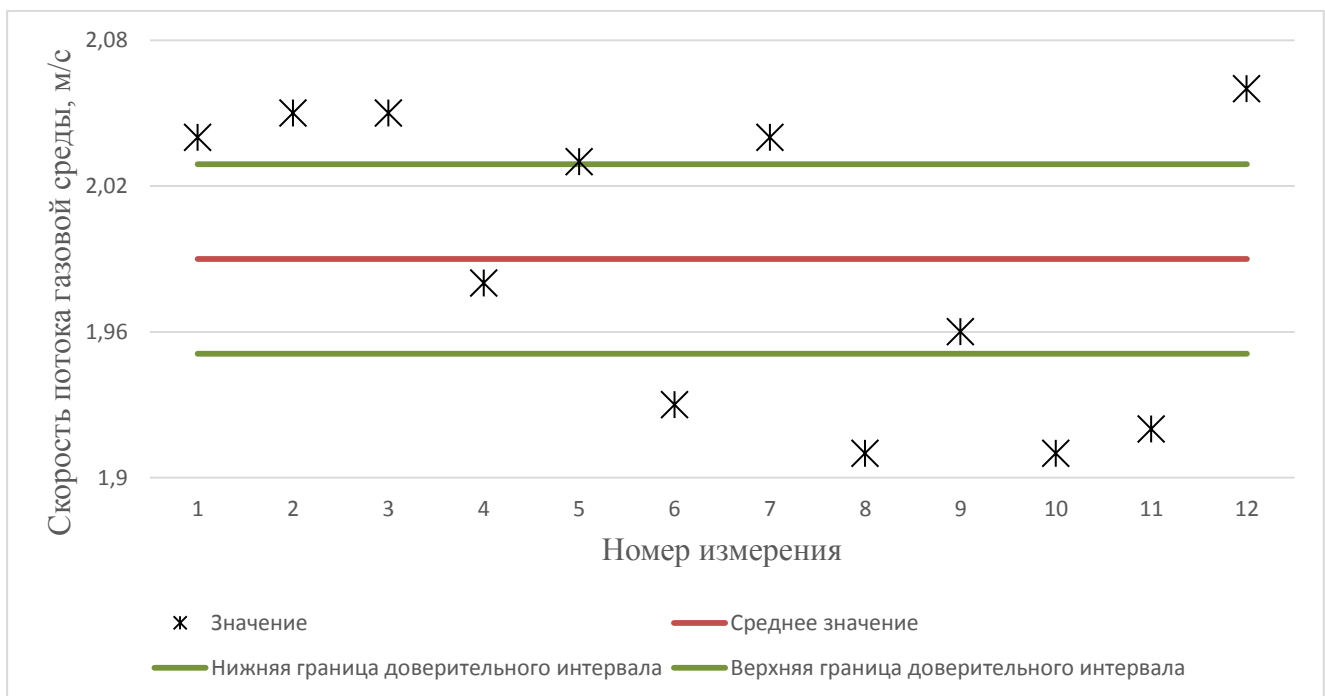


Рисунок 6.2 – Режим работы № 2

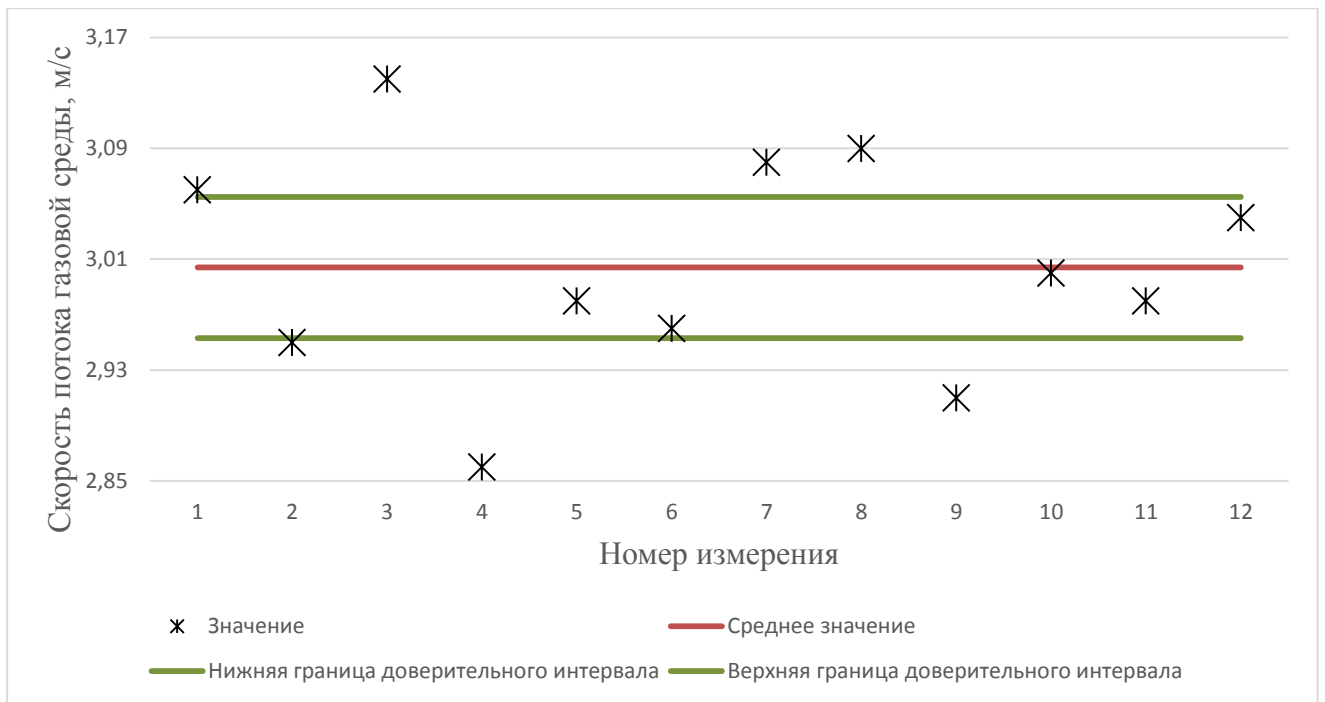


Рисунок 6.3 – Режим работы № 3

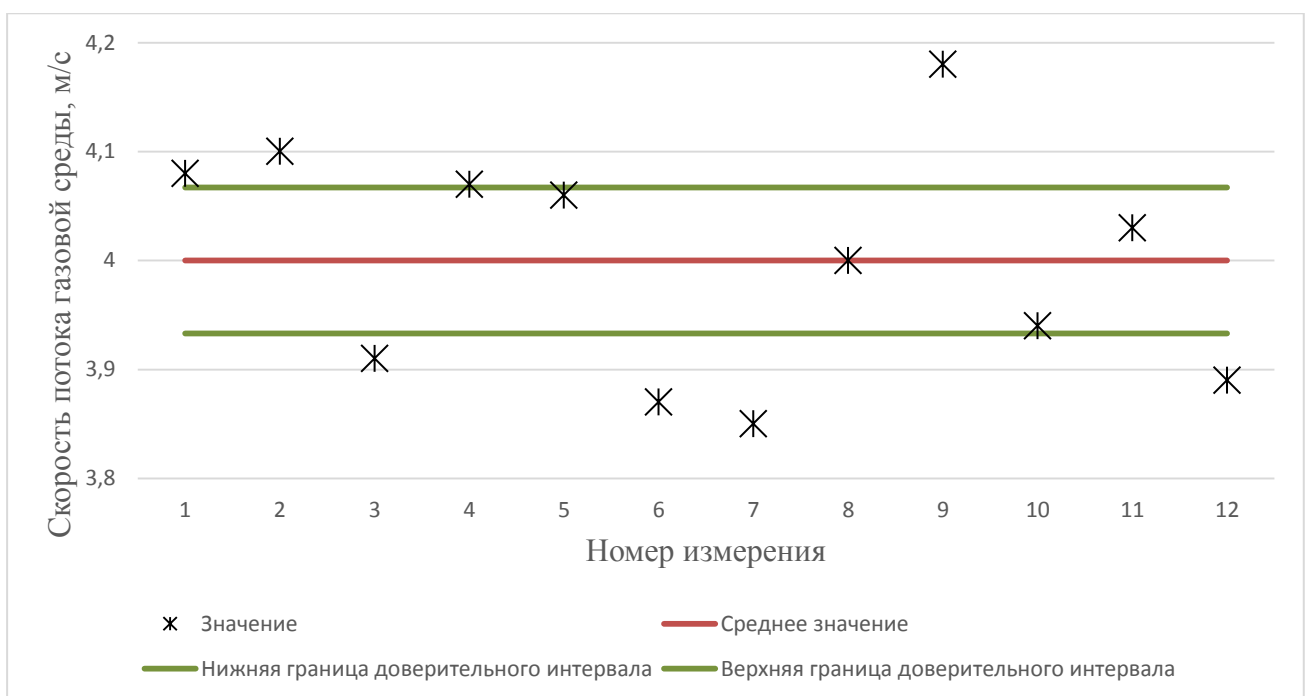


Рисунок 6.4 – Режим работы № 4

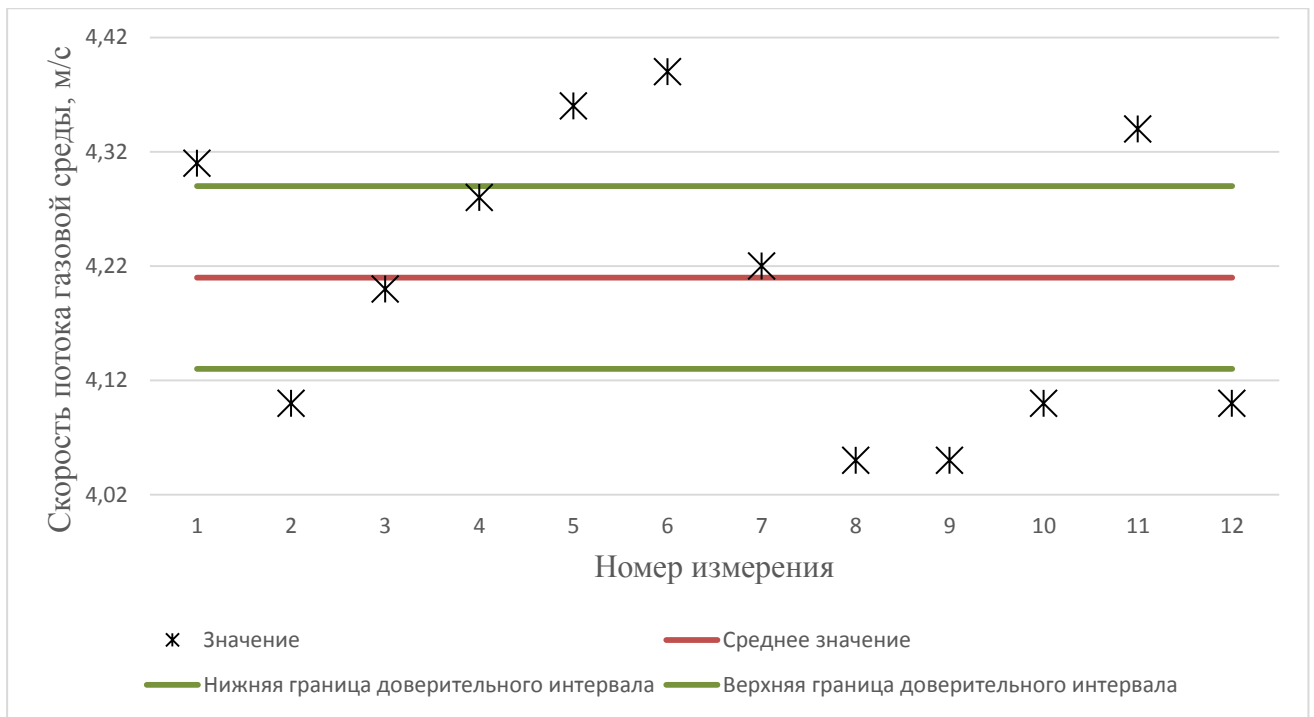


Рисунок 6.5 – Режим работы № 5

С помощью полученных средних значений скоростей воздушных потоков системы противодымной вытяжной вентиляции ее объемный расход определялся с помощью формулы

$$W_{\text{в}} = \frac{\pi d_{\text{в}}^2}{4} \cdot v_{\text{в}}, \quad (6.1)$$

где

$d_{\text{в}}$, м – диаметр вытяжного отверстия;

$v_{\text{в}}$, м/с – среднее значение скорости.

С целью получения достоверных регрессионных уравнений для твердых горючих материалов и жидкости, 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, схема которого представлена в таблице 6.3, выполнена первичная статистическая обработка результатов проведенных серий эксперимента.

Таблица 6.3 – Композиционный план Бокса-Уилсона

№ опыта	X_0	План эксперимента			$X_1 \cdot X_2$	$X_1 \cdot X_3$	$X_2 \cdot X_3$	$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$	X_1'	X_2'	X_3'	Последовательность получения экспериментальных данных									
		X_1	X_2	X_3								Реплика №1	Реплика №2	Реплика №3	Реплика №4	Реплика №5	Реплика №6	Реплика №7	Реплика №8	Реплика №9	Реплика №10
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	5	13	11	5	12	10	6	14	5	12
2	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	13	12	12	2	5	13	2	4	13	13
3	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	7	3	3	6	4	3	10	8	1	8
4	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	8	9	15	14	9	11	4	3	2	3
5	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	3	5	5	4	14	5	12	1	3	4
6	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	6	4	13	9	13	1	11	15	10	14
7	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	11	14	1	8	2	9	14	2	12	9
8	+1	1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	15	6	6	12	11	2	3	11	15	1
9	+1	+1,215	0	0	0	0	0	0	+0,75	-0,73	-0,73	1	11	10	11	6	15	7	13	4	10
10	+1	-1,215	0	0	0	0	0	0	+0,75	-0,73	-0,73	14	10	2	7	3	4	13	12	9	2
11	+1	0	+1,215	0	0	0	0	0	-0,73	+0,75	-0,73	2	7	7	15	10	6	8	7	8	7
12	+1	0	-1,215	0	0	0	0	0	-0,73	+0,75	-0,73	10	8	4	1	1	7	9	6	14	15
13	+1	0	0	+1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,75	4	1	14	10	7	8	15	10	11	11
14	+1	0	0	-1,215	0	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,75	9	2	8	13	15	14	5	9	6	5
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	12	15	9	3	8	12	1	5	7	6

Представленный в таблице 6.3 порядок получения экспериментальных данных определялся с помощью применения алгоритма генерации равномерно распределенных случайных чисел, опирающийся на линейный конгруэнтный метод [152].

Определение необходимого объема выборки (количества реплик) в каждом опыте проводимого экспериментального исследования контролировалось с помощью проверки следующего условия [107]

$$n \geq \frac{t_{\alpha m}^2 \cdot S_y^2}{\delta^2}, \quad (6.2)$$

где

$t_{\alpha m}$ – коэффициент Стьюдента для уровня значимости α с числом степеней свободы $m=n-1$;

S_y^2 – оценка дисперсии среднего;

δ – одна вторая ширины доверительного интервала.

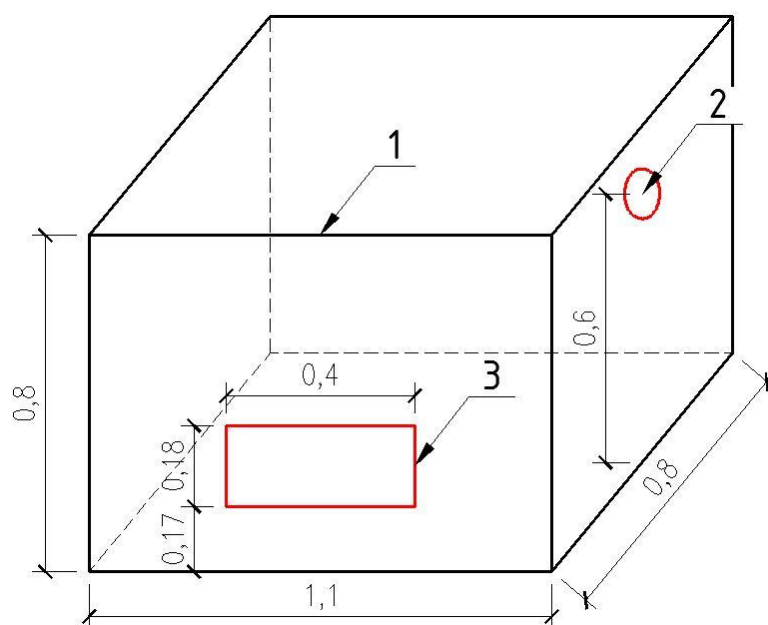
Выполнение условия (6.2) при каждом повторении опыта проверялось методом последовательного приближения, так как значение выборочной дисперсии является неизвестной величиной. При этом несмещенная состоятельная оценка дисперсии или выборочная дисперсия отдельного измерения определяется по следующей формуле [2]

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{n-1}. \quad (6.3)$$

6.2. Описание проведенных экспериментов

При проведении экспериментальных исследований по определению закона изменения неустановившейся удельной массовой скорости выгорания твердого материала была разработана и выполнена физически модель помещения, условная схема которой с размерными линиями и обозначениями, показана на рисунке 6.6. Все размеры указаны в метрах. Модель выполнена из

стекломагнезита листа толщиной 0,01 м. Моделирование системы противодымной вытяжной вентиляции проводилось с помощью радиального вентилятора мощностью 216 Вт, который подсоединялся к боковой стене модели с помощью гофрированной трубы, имеющей диаметр 0,1 м. Регулировка скорости потока газовой среды осуществлялась с помощью высокоточного частотного преобразователя фирмы Lenze, подключенного через электросеть непосредственно к вентилятору. Экспериментальные исследования выполнены в центре коллективного пользования Воронежского государственного архитектурно-строительного университета.



1 – физическая модель; 2 – отверстие системы противодымной вытяжной вентиляции;
3 – открытый проем для поджигания горючего материала и обеспечения негерметичности физической модели.

Рисунок 6.6 – Условная схема физической модели помещения

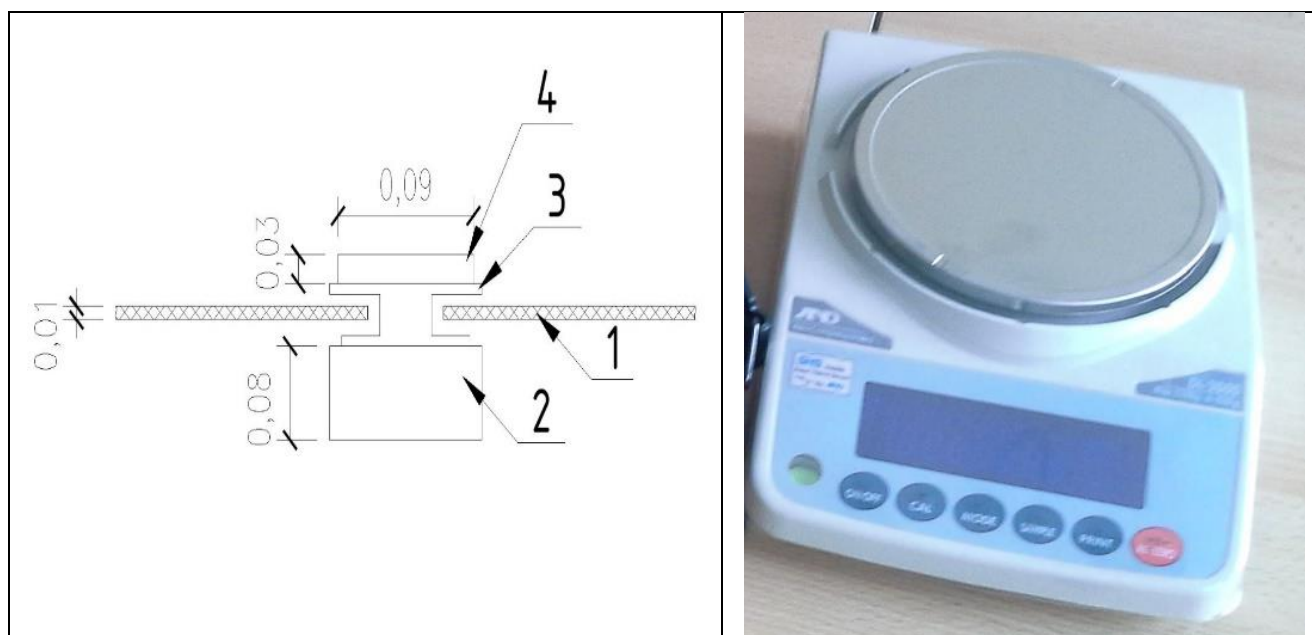
Фотографии выполненной физической модели помещения представлены на рисунке 6.7.

В качестве средств измерения были использованы следующие лабораторные приборы. Лабораторные весы марки ANDDL-3000, класс точности – II (высокий), точность деления отсчета – 0,01 гр. Весы

располагались непосредственно под моделью помещения, а взвешивание осуществлялось через отверстие в основании физической модели с помощью дополнительной платформы. Считывание показаний весов осуществлялось через каждые 2 секунды. Условная схема расположения весов и фотография представлены на рисунке 6.8. Свидетельство о поверки лабораторных весов представлено в приложении I.



Рисунок 6.7 – Фото физической модели помещения



1 – основание физической модели; 2 – лабораторные весы; 3 – дополнительная платформа;
4 – поддон с горючим материалом.

Рисунок 6.8 – Схема расположения и фото лабораторных весов

Контроль температуры газовой среды внутри модели помещения осуществлялся с помощью многоканального измерителя температуры ТМ – 12М, класс точности – II (высокий). Температура измерялась с помощью 12 термопар, которые располагались в центре условных равновеликих объемов физической модели. Датчики крепились на медную проволоку, натянутую между гранями модели. Результаты измерения через каждые 5 секунд выводились на экран измерительного прибора и передавались на компьютер. Условная схема расположения термопар, расположенных на первом уровне и фото термоизмерителя ТМ – 12М показаны на рисунке 6.9.

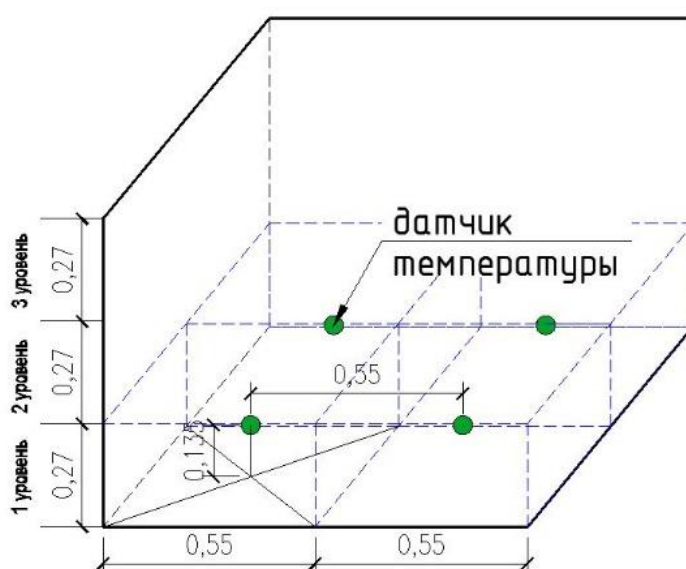
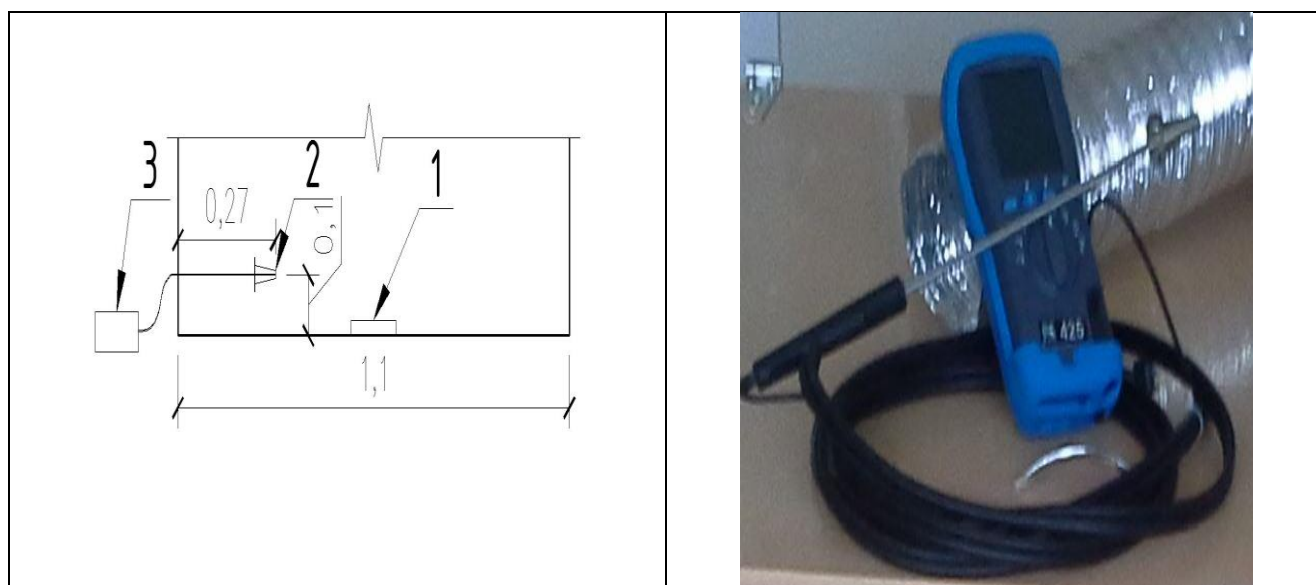


Рисунок 6.9 – Схема расположения термопар на первом уровне и фото термоизмерителя ТМ – 12М

Контроль концентрации компонентов (кислород, монооксид и диоксид углерода) газовой среды внутри физической модели помещения осуществлялся с помощью одноканального отбирающего пробы газоанализатора марки Kane 425, высокого класса точности – II. Отбор проб газовой смеси выполнялся с помощью зонда, помещенного внутрь модели помещения. Схема расположения зонда и его фото показаны на рисунке 6.10. Свидетельство о поверке газоанализатора представлено в приложении II.



1 – поддон с горючим материалом; 2 – зонд газоанализатора для отбора проб;
3 – газоанализатор.

Рисунок 6.10 – Схема и фото расположения зонда газоанализатора в физической модели помещения

При проведении каждого опыта лабораторная чашка из алюминия (поддон) диаметром 0,09 м, установленная на дополнительной платформе в центре модели помещения, заполнялась одним и тем же количеством твердого горючего материала: смесь деревянных заготовок, бумаги и текстиля. После стабилизации показаний весов твердый горючий материал поджигался с одновременным включением измерительных приборов. Все измеряемые параметры каждые 2 секунды фиксировались в памяти компьютера. Результаты по каждой серии опытов и первичной статистической обработки для твердых горючих материалов представлены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Результаты экспериментальных исследований и первичной статистической обработки

Номер опыта	Результаты экспериментальных исследований (удельная массовая скорость выгорания, кг/м ² ·с)										Результаты первичной статистической обработки		
	Реплика №1	Реплика №2	Реплика №3	Реплика №4	Реплика №5	Реплика №6	Реплика №7	Реплика №8	Реплика №9	Реплика №10	Среднее арифметическое значение	Дисперсия	Среднее квадратичное отклонение
1	0.00736	0.00804	0.00712	0.00673	0.00797	0.00735	0.00727	0.00747	0.00759	0.00704	0.007392	0.00000016228	0.000402845
2	0.00699	0.00764	0.00662	0.00696	0.00738	0.00688	0.00670	0.00650	0.00654	0.00737	0.006958	0.00000015223	0.00039016
3	0.00552	0.00518	0.00541	0.00572	0.00597	0.00575	0.00591	0.00556	0.00568	0.00505	0.005573	0.00000008805	0.000296729
4	0.00441	0.00468	0.00463	0.00471	0.00434	0.00461	0.00404	0.00475	0.00441	0.00429	0.004487	0.00000005135	0.000226596
5	0.01103	0.01097	0.01090	0.01088	0.01082	0.01134	0.01184	0.01148	0.01089	0.01174	0.01119	0.00000014660	0.000382885
6	0.01250	0.01244	0.01182	0.01260	0.01240	0.01308	0.01352	0.01168	0.01269	0.01310	0.012584	0.00000031787	0.000563798
7	0.01398	0.01327	0.01272	0.01496	0.01461	0.01313	0.01421	0.01535	0.01502	0.01448	0.014172	0.00000078420	0.000885552
8	0.01434	0.0151	0.01426	0.01368	0.01443	0.01362	0.01509	0.01541	0.01427	0.01326	0.014344	0.00000048839	0.000698848
9	0.00588	0.00634	0.00631	0.00589	0.00531	0.00636	0.00630	0.00531	0.00607	0.00588	0.005964	0.00000015665	0.000395789
10	0.00110	0.00106	0.00104	0.00102	0.00106	0.00108	0.00108	0.00119	0.00119	0.00115	0.001097	0.00000000380	6.16681E-05
11	0.00772	0.00700	0.00780	0.00809	0.00834	0.00820	0.00722	0.00790	0.00699	0.00781	0.007807	0.00000017590	0.000419404
12	0.00883	0.00951	0.00901	0.00925	0.00932	0.00887	0.00969	0.00869	0.00893	0.00895	0.009104	0.00000010416	0.00032274
13	0.01287	0.01416	0.01411	0.01194	0.01266	0.01262	0.01195	0.01301	0.01230	0.01290	0.012851	0.00000059578	0.000771871
14	0.00552	0.00604	0.00572	0.00514	0.00594	0.00600	0.00539	0.00567	0.00501	0.00536	0.005577	0.00000012844	0.000358387
15	0.00772	0.00712	0.00736	0.00733	0.00742	0.00805	0.00808	0.00758	0.00729	0.00737	0.007533	0.00000010455	0.000323345

6.3. Анализ экспериментальных результатов

Опираясь на проверочное неравенство (6.2) для полученных экспериментальных данных в опыте №1 (таблица 6.4) методом последовательных приближений рассчитано необходимое количество повторений, равное 10, для заданных значений уровня значимости $\alpha = 0,05$ и половины доверительного интервала $\delta = \pm 1,2 \cdot 10^{-4}$. В дальнейшем каждый из проводимых опытов повторялся 10 раз. Для всех полученных экспериментальных данных рассчитаны границы доверительного интервала при заданных значениях доверительной вероятности $P = 0,90; 0,95; 0,99$. Доверительная вероятность и доверительный интервал связаны между собой соотношением [20]

$$P(b \in [b^* - \varepsilon, b^* + \varepsilon]) = \int_{b^* - \varepsilon}^{b^* + \varepsilon} f(b) db = F(b^* + \varepsilon) - F(b^* - \varepsilon). \quad (6.4)$$

В таблице 6.5 представлены значения границ доверительного интервала при заданных величинах доверительной вероятности в каждом опыте.

На рисунке 6.11 для каждого опыта экспериментальных исследований показан график попадания значения распределенной по нормальному закону случайной величины в интервал $[-\infty, x]$. Так как согласно приведенных графиков кривые распределения вероятностей не пересекаются, то грубые погрешности при получении экспериментальных данных отсутствуют.

На рисунке 6.12 для каждой выборки экспериментальных исследований показан вид поверхности функции распределения вероятностей при нормальном законе в зависимости от величин среднего значения и среднего квадратичного отклонения.

Таблица 6.5 – Границы доверительного интервала

№ опыта	Доверит. вер-ть P	Границы доверительного интервала	№ опыта	Доверит. вер-ть P	Границы доверительного интервала
1	0,90	0.0067291<x<0.0080543	9	0,90	0.0053129<x<0.0066149
	0,95	0.0066021<x<0.0081813		0,95	0.0051882<x<0.0067397
	0,99	0.0063540<x<0.0084294		0,99	0.0049444<x<0.0069834
2	0,90	0.0063162<x<0.0075997	10	0,90	0.0009957<x<0.0011985
	0,95	0.0061933<x<0.0077227		0,95	0.0009762<x<0.0012180
	0,99	0.0059530<x<0.0079629		0,99	0.0009383<x<0.0012559
3	0,90	0.0050847<x<0.0060609	11	0,90	0.0071168<x<0.0084965
	0,95	0.0049912<x<0.0061544		0,95	0.0069847<x<0.0086287
	0,99	0.0048085<x<0.0063371		0,99	0.0067264<x<0.0088870
4	0,90	0.0041146<x<0.0048601	12	0,90	0.0085736<x<0.0096353
	0,95	0.0040432<x<0.0049315		0,95	0.0084719<x<0.0097370
	0,99	0.0039037<x<0.0050710		0,99	0.0082731<x<0.0099358
5	0,90	0.0105600<x<0.0118196	13	0,90	0.0115813<x<0.0141205
	0,95	0.0104393<x<0.0119402		0,95	0.0113381<x<0.0143637
	0,99	0.0102035<x<0.0121760		0,99	0.0108627<x<0.0148391
6	0,90	0.0116563<x<0.0135110	14	0,90	0.0049879<x<0.0061669
	0,95	0.0114786<x<0.0136887		0,95	0.0048749<x<0.0062798
	0,99	0.0111314<x<0.0140359		0,99	0.0046542<x<0.0065005
7	0,90	0.0127150<x<0.0156282	15	0,90	0.0070010<x<0.0080647
	0,95	0.0124359<x<0.0159072		0,95	0.0068991<x<0.0081666
	0,99	0.0118906<x<0.0164526		0,99	0.0067000<x<0.0083657
8	0,90	0.0131948<x<0.0154938			
	0,95	0.0129746<x<0.0157140			
	0,99	0.0125442<x<0.0161444			

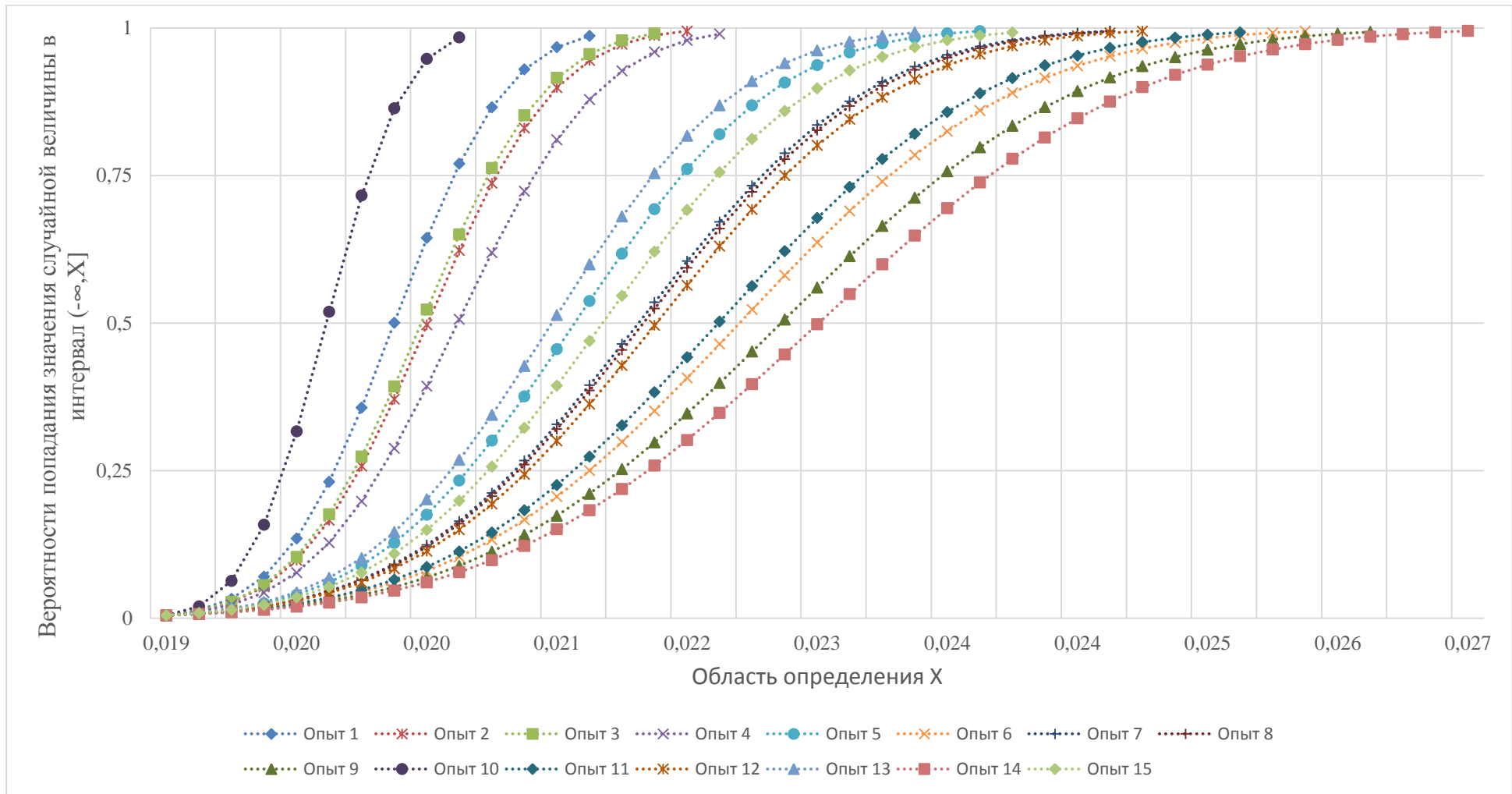


Рисунок 6.11 – Графики вероятности попадания значения распределенной по нормальному закону случайной величины в интервал $(-\infty, x)$

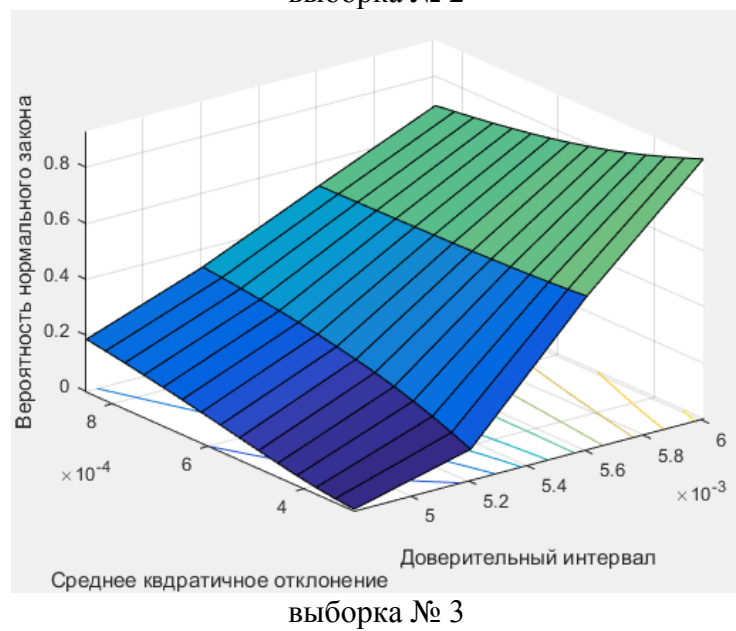
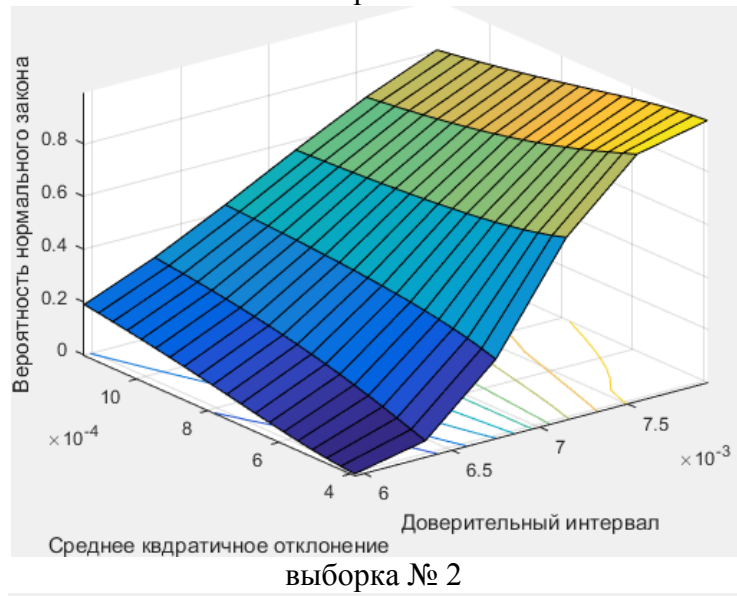
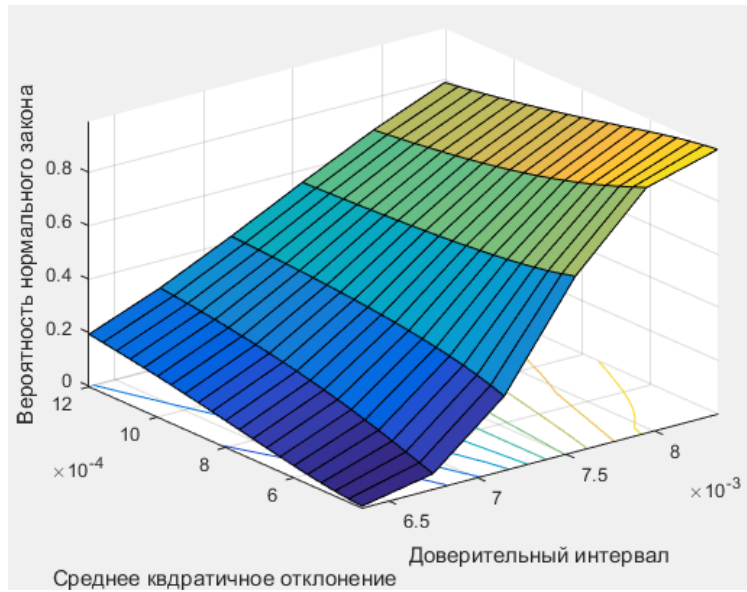
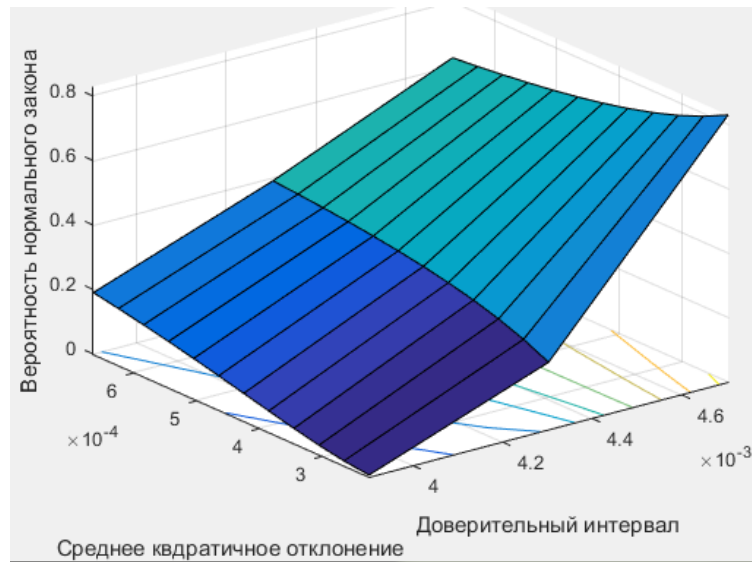
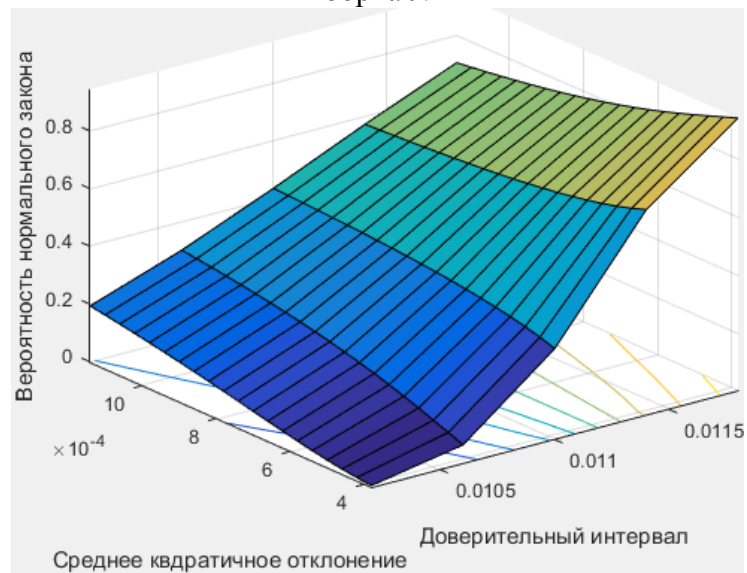


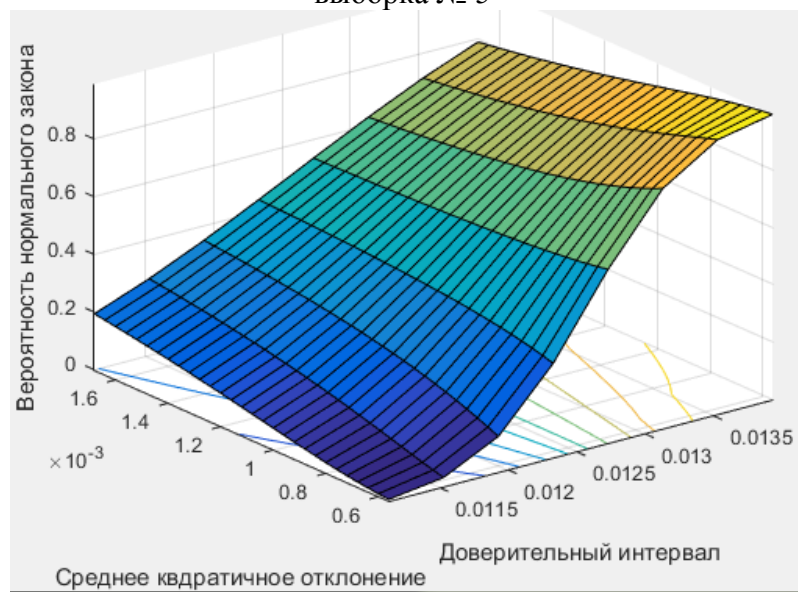
Рисунок 6.12 (начало)



выборка № 4

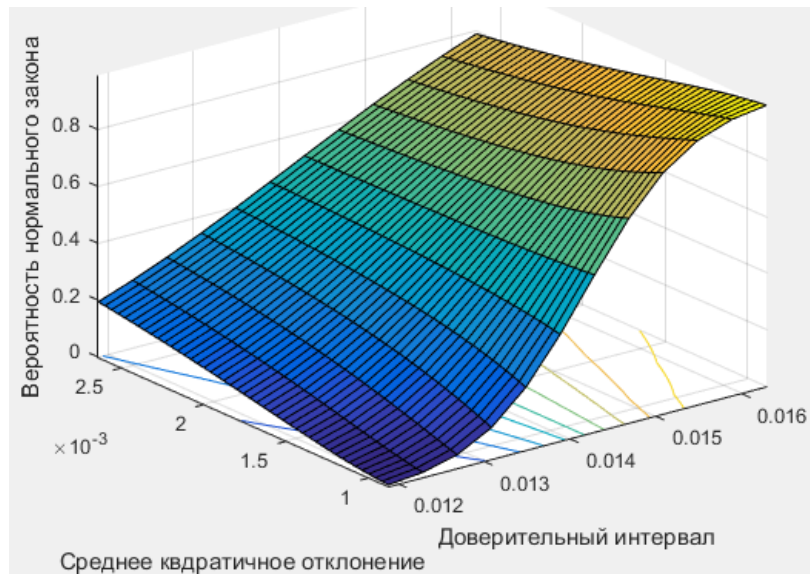


выборка № 5

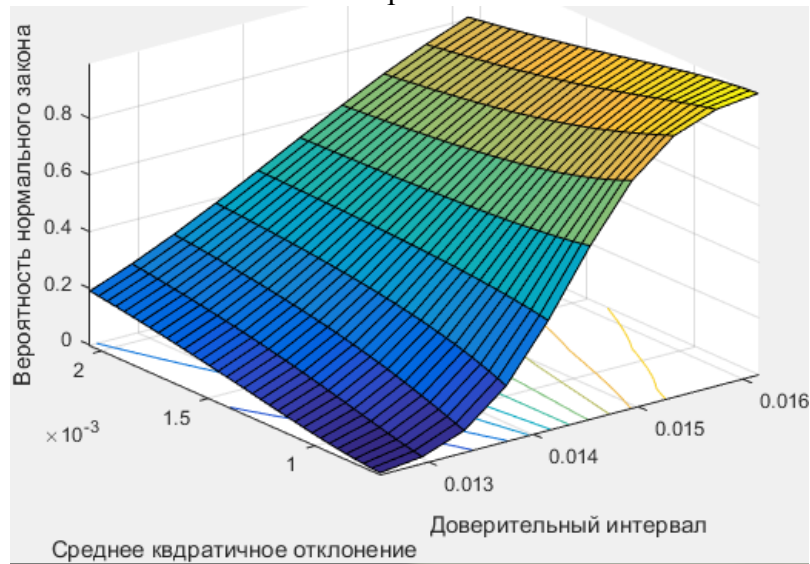


выборка № 6

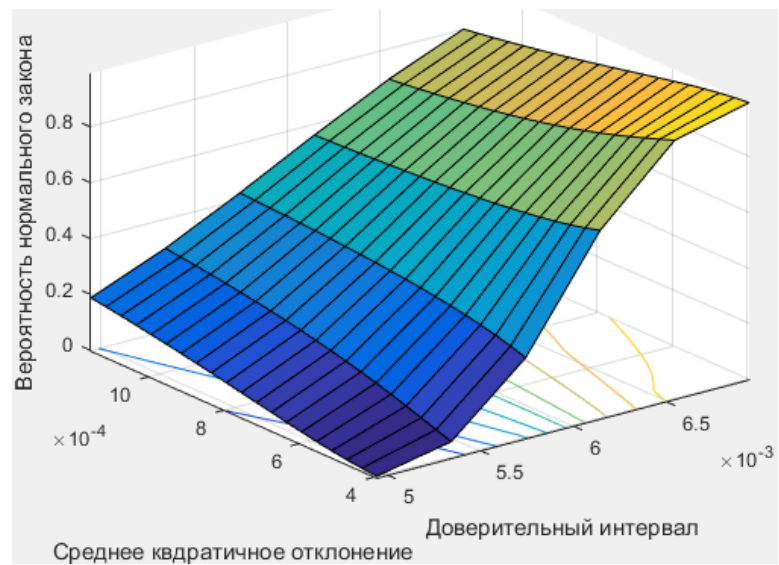
Рисунок 6.12 (продолжение)



выборка № 7

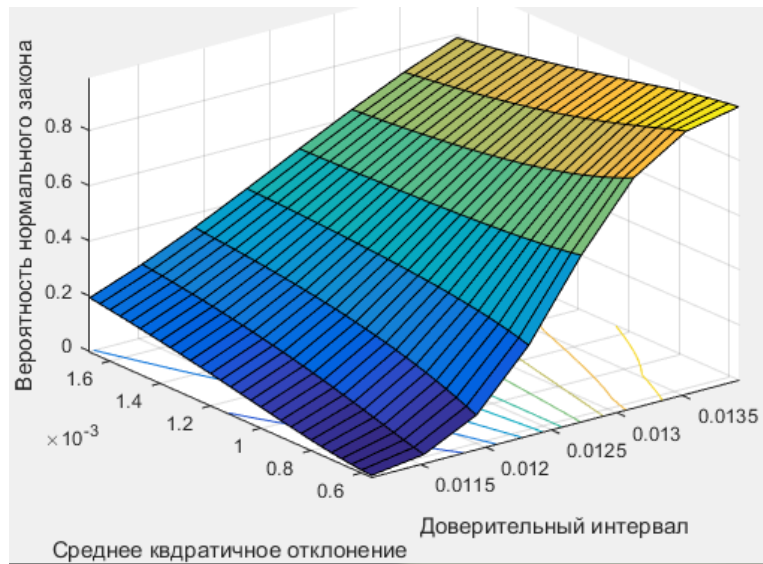


выборка № 8

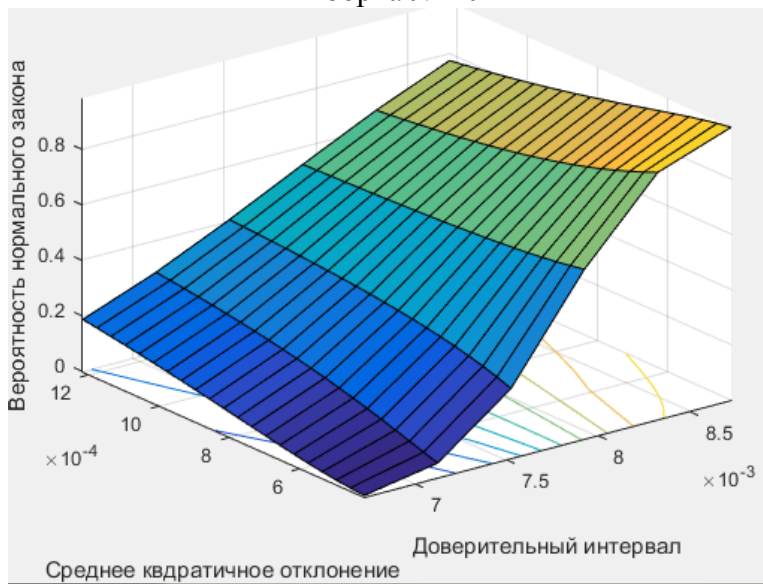


выборка № 9

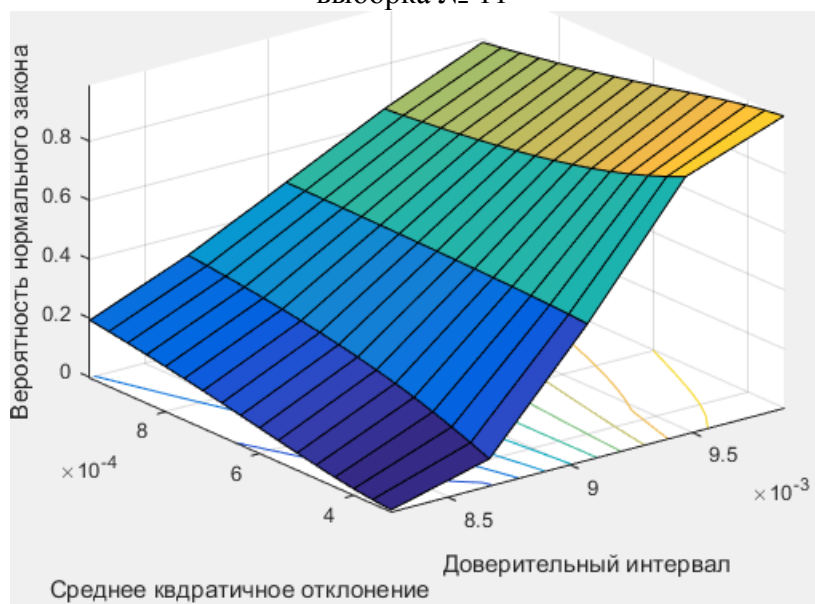
Рисунок 6.12 (продолжение)



выборка № 10



выборка № 11



выборка № 12

Рисунок 6.12 (продолжение)

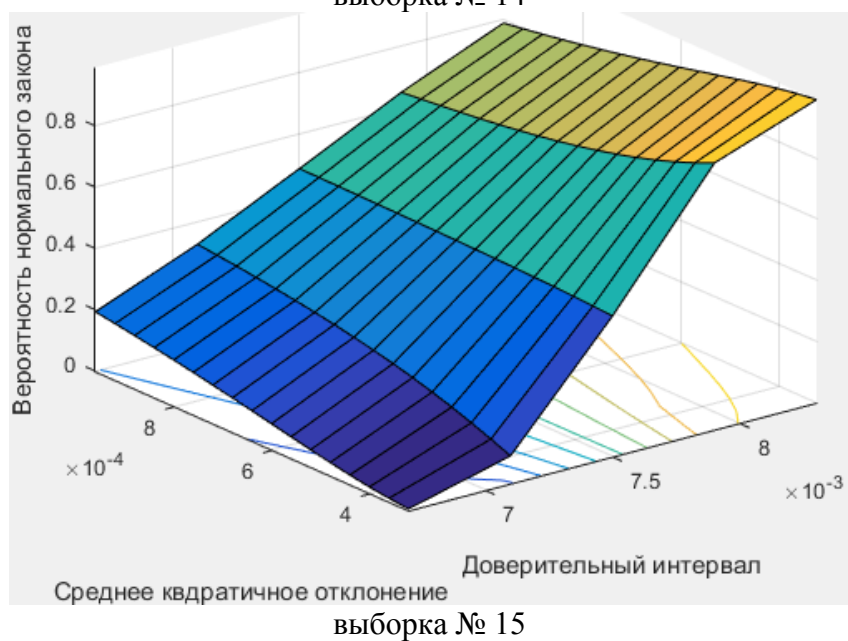
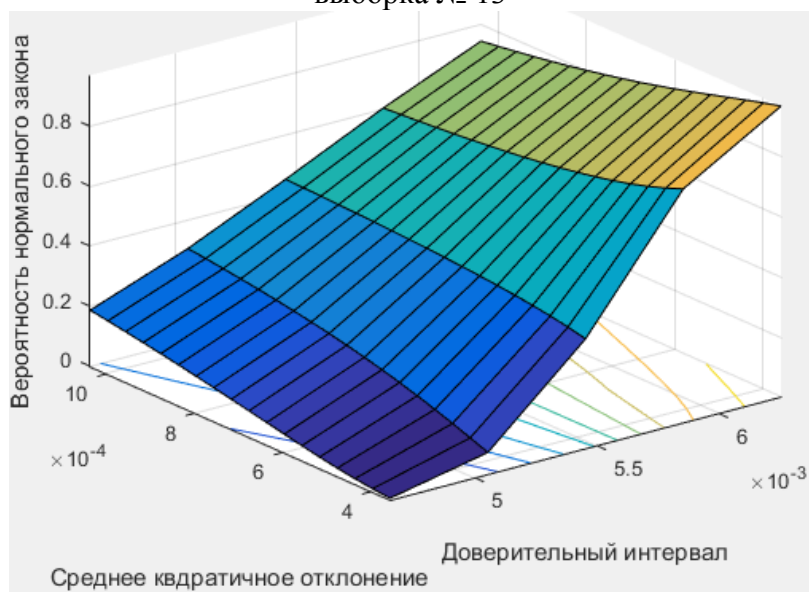
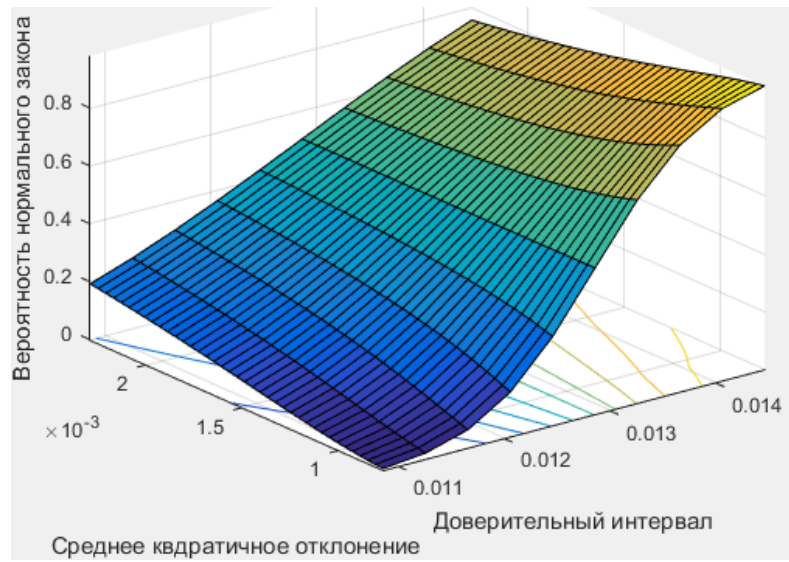


Рисунок 6.12 (окончание)

Все результаты опытов экспериментального исследования должны воспроизводиться при повторном проведении. Это свойство воспроизводимости опытов проверяется выполнением гипотезы однородности (равенства) дисперсий в каждой точке факторного пространства. Значение выборочной дисперсии воспроизводимости в каждом j -том опыте определяется равенством [2]

$$S_{yj}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{n-1}. \quad (6.5)$$

В свою очередь гипотеза однородности дисперсий проверяется с помощью критерия Кохрена, значение которого вычисляется по формуле

$$G_P = S_{yj, \max}^2 / \sum_{j=1}^n S_{yj}^2. \quad (6.6)$$

Подставляя в формулу (6.6) данные для дисперсии из таблицы 6.4, вычислим расчетное значение критерия Кохрена

$$G_p = 0,78 \cdot 10^{-6} / 3,46 \cdot 10^{-6} = 0,225.$$

Согласно таблице распределения Кохрена [2] при заданном уровне значимости $\alpha = 0,05$ критическое значение критерия Кохрена равно $G_{кр} = 0,225$. Так как $G_p < G_{кр}$, то гипотеза об однородности дисперсий выполняется.

Коэффициенты квадратичного регрессионного уравнения вычисляются по формуле [47]

$$b_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot \bar{y}_j / \sum_{j=1}^n x_{ij}^2. \quad (6.7)$$

С учетом экспериментальных данных таблицы 6.4 с помощью формулы (6.7) получим следующие значения коэффициентов регрессионного уравнения:

$$\begin{aligned} b_0 &= 0,019092; b_1 = 0,005596; b_2 = -0,000370; b_3 = 0,000475; \\ b_{12} &= 0,000209; b_{13} = 0,001760; b_{23} = 0,000033; b_{123} = -0,000470; \\ b_{11} &= -0,0039; b_{22} = -0,00071; b_{33} = -0,00095. \end{aligned}$$

Для проведения дисперсионного анализа и выявления значимых коэффициентов регрессионного уравнения воспользуемся критерием

Стьюдента. Вычислив по экспериментальным данным при “нулевом” уровне факторного пространства дисперсию воспроизводимости S_r , для каждого коэффициента определим ошибку по формуле

$$S_{b_i} = S_r / \sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}. \quad (6.8)$$

Величина критерия Стьюдента для коэффициента с номером i вычисляется по формуле

$$t_i = |b_i| / S_{b_i}. \quad (6.9)$$

Окончательно получим следующие значения:

$$t_0 = 391,63; t_1 = 104,51; t_2 = 4,73; t_{12} = 9,54; t_{13} = 27,93; t_{23} = 5,79;$$

$$t_{123} = 1,76; t_{11} = 16,37; t_{22} = 28,72; t_{33} = 35,66.$$

Коэффициенты регрессионного уравнения считаются значимыми, если выполняется следующее неравенство [61]

$$t_i \geq t_{табл}, \quad (6.10)$$

где при выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$ табличное значение равно $t_{табл} = 4,3$.

Сравнив расчетные значения критерия Стьюдента t_i с $t_{табл}$, можно сделать вывод, что значимыми являются следующие коэффициенты: $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$. Окончательно регрессионное уравнение, описывающее динамику удельной массовой скорости твердых горючих материалов при неустановившемся процессе горения с учетом времени включения и объемного расхода системы противодымной вытяжной вентиляции, принимает вид

$$\psi_s = (8,4 + 3 \cdot k_1 - 0,14 \cdot k_2 + 0,85 \cdot k_3 + 0,39 \cdot k_1 k_2 + 1,13 \cdot k_1 k_3 - 0,23 \cdot k_2 k_3 - 1,21 \cdot k_4 + 2,12 \cdot k_5 + 2,64 \cdot k_6) \cdot 10^{-3}, \quad (6.11)$$

где

$$k_1 = \frac{\tau - 90}{70}; \quad k_2 = \frac{\tau^* - 50}{24}; \quad k_3 = \frac{W_6 - 0,018}{0,006}; \quad k_4 = \left(\frac{\tau - 90}{70} \right)^2 - 0,73;$$

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

Регрессионное уравнение (6.11) получено при экспериментальном исследовании горения твердых материалов: смесь деревянных заготовок, бумаги и текстиля. Чтобы в этом уравнении было возможным учитывать в первом приближении физико-химические свойства горючего материала, вычтем из правой части среднее значение начальной удельной массовой скорости ψ_{s0} . Приходим к уравнению вида

$$\psi_s = \psi_{s0} + (k_0 + 3 \cdot k_1 - 0,14 \cdot k_2 + 0,85 \cdot k_3 + 0,39 \cdot k_1 k_2 + 1,13 \cdot k_1 k_3 - 0,23 \cdot k_2 k_3 - 1,21 \cdot k_4 + 2,12 \cdot k_5 + 2,64 \cdot k_6) \cdot 10^{-3}, \quad (6.12)$$

где

ψ_{s0} , кг/(м²·с) – начальное значение удельной массовой скорости горения твердого горючего материала;

$$k_0 = 8,4 - \psi_{s0} \cdot 10^3.$$

Аналогично равенству (6.11) получено регрессионное уравнение, описывающее динамику удельной массовой скорости выгорания горючей жидкости с учетом времени включения и объемного расхода системы противодымной вытяжной вентиляции

$$\psi_s = (19,1 + 5,6 \cdot k_1 - 0,37 \cdot k_2 + 0,48 \cdot k_3 + 1,8 \cdot k_1 k_3 - 3,9 \cdot k_4) \cdot 10^{-3}, \quad (6.13)$$

где

$$k_1 = \frac{\tau - 110}{80}, \quad k_2 = \frac{\tau^* - 60}{30}, \quad k_3 = \frac{W_g - 0,02355}{0,00785}, \quad k_4 = \left(\frac{\tau - 110}{80} \right)^2 - 0,73.$$

С учетом в первом приближении физико-химических свойств горючей жидкости уравнение (6.13) аналогично (6.12) принимает вид

$$\psi_s = \psi_{s0} + (8,1 + 5,6 \cdot k_1 - 0,37 \cdot k_2 + 0,48 \cdot k_3 + 1,8 \cdot k_1 k_3 - 3,9 \cdot k_4) \cdot 10^{-3}, \quad (6.14)$$

где

ψ_{s0} , кг/(м²·с) – начальное значение удельной массовой скорости горения жидкости, которое согласно справочным данным для используемого в

экспериментальных исследованиях этилового спирта равно 0,011 кг/(м²·с).

6.4. Проверка адекватности полученных регрессионных уравнений и переход к натурному объекту

Для проверки адекватности полученного уравнения регрессии (6.11) воспользуемся критерием Фишера. Предварительно определяется дисперсия адекватности [47]

$$S_a^2 = \frac{\sum_{i=1}^N n \cdot (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{N - L}, \quad (6.15)$$

где N – количество выборок;

n – объем выборки;

L – количество значимых коэффициентов регрессии;

\bar{y}_i – среднее значение выборки с номером i ;

\hat{y}_i – расчетное значение отклика, которое определяется с помощью полученного регрессионного уравнения в опыте с номером i .

Расчетная величина критерия Фишера определяется формулой [47]

$$F_p = S_a^2 / (n \cdot S_y^2). \quad (6.16)$$

В результате вычислений получено следующее значение $F_p = 4,37$. При этом в соответствии с таблицей квантилей распределения Фишера [47] критическое значение критерия Фишера составляет $F_{кр} = 19,67$. Так как $F_p < F_{кр}$, то разработанное регрессионное уравнение адекватно, и может быть использовано при проведении практических расчетов.

Определим корреляционную связь между экспериментальными данными и полученными с помощью уравнения (6.11) численными результатами. Разброс экспериментальных данных относительно регрессионной кривой характеризуется значением выборочного коэффициента корреляции [107]

$$r_{xy} = \frac{\sum (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (6.17)$$

где $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$, $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$ – среднее значение выборок.

Выборочный коэффициент корреляции будет обладать свойством статистической значимости при выполнении условия [66]

$$|r_{xy}| \cdot \sqrt{n-1} \geq r_{кр}, \quad (6.18)$$

где $r_{кр}$ – критическое значение коэффициента корреляции, который определяется по таблице [66] для заданного уровня значимости α и степени свободы $m = n - 1$.

С учетом данных проведенного экспериментального исследования неравенство (6.18) в численных величинах принимает вид $2,82 > 0,602$, то есть удовлетворяется, что является подтверждением статистической значимости коэффициента корреляции.

Точность полученного регрессионного уравнения определяется коэффициентом детерминации, вычисляемого по формуле

$$d_{xy} = r_{xy}^2. \quad (6.19)$$

Вычисленное значение $d_{xy} = 0,92$ означает, что точность предложенного уравнения регрессии (6.11) составляет 92%.

На рисунке 6.13 представлено сравнение кривой для средних значений экспериментальных данных изменения удельной массовой скорости горения твердого материала и ее регрессионной кривой.

Для жидкости, используя полученные в ходе экспериментальных исследований данные, для выборочного коэффициента корреляции получаем следующее значение $r_{xy} = 0,94$. Визуальное сравнение расположения экспериментальных точек и регрессионной кривой для этого случая показано на рисунке 6.14.

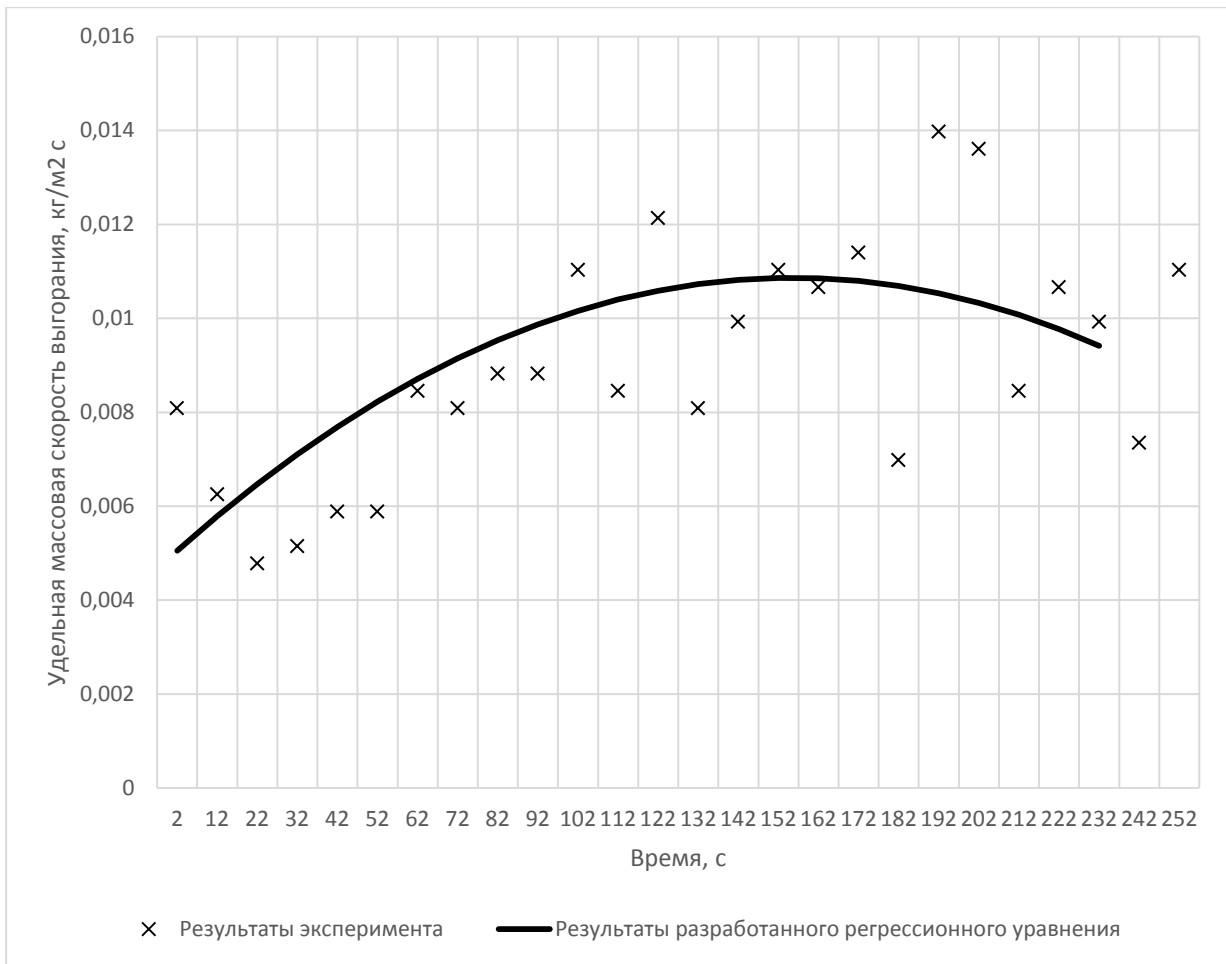


Рисунок 6.13 – Зависимость удельной массовой скорости горения твердого материала от времени

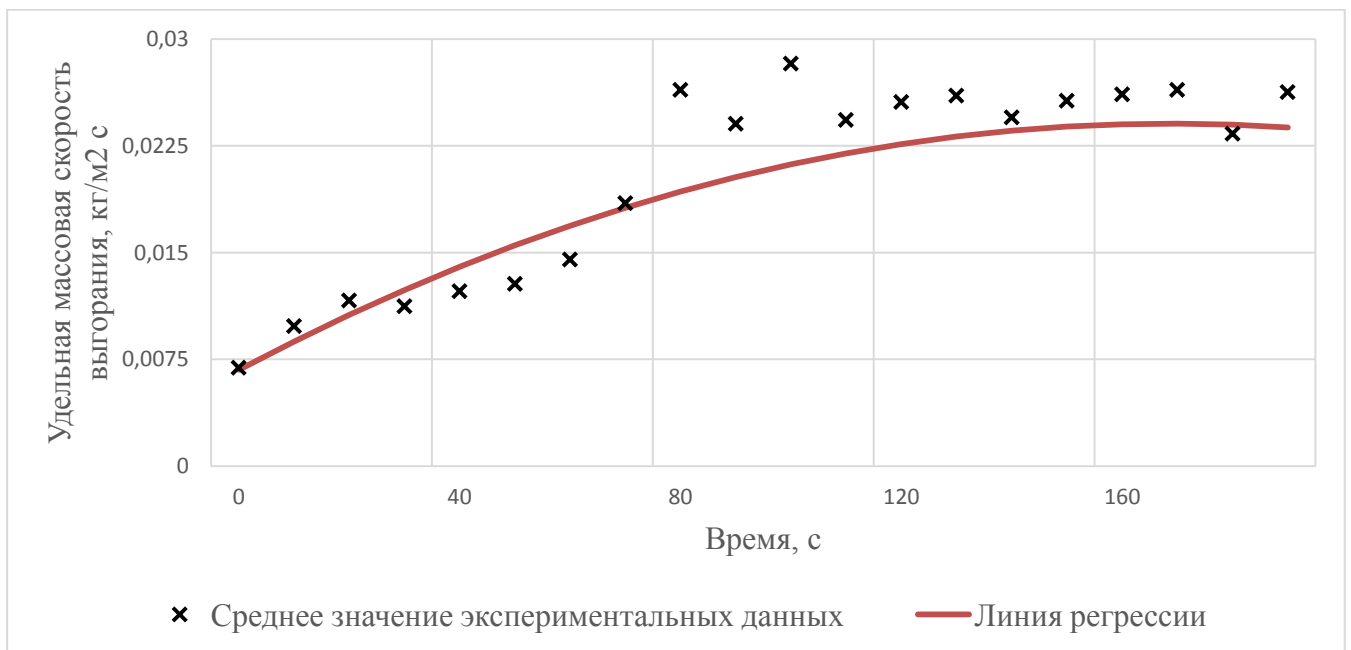


Рисунок 6.14 – Зависимость удельной массовой скорости горения жидкости от времени

Регрессионные уравнения, описывающие закон изменения массовой скорости выгорания твердых материалов и жидкости, получены с помощью экспериментальных исследований, выполненных на физической модели помещения. При переходе к натурным объектам необходимо выполнить масштабирование переменных, которые входят в состав полученных уравнений. Так как время рассматривалось в реальном масштабе, то продолжительность пожара и время включения системы противодымной вытяжной вентиляции масштабировать не нужно (коэффициенты k_1, k_2, k_4, k_5 в уравнении (6.11); k_1, k_2, k_4 в уравнении (6.13)). Масштабированию подлежат коэффициенты k_3, k_6 в уравнении (6.11) и только коэффициент k_3 регрессионного уравнения (6.13)

$$k_3 = \frac{W_g - 0,02355}{0,00785} = \frac{W_g}{0,00785} - 3. \quad (6.20)$$

При выборе в эксперименте объемного расхода системы противодымной вытяжной вентиляции учитывалась величина кратности воздухообмена для объема реального помещения. Условием подобия помещений является следующее отношение

$$\frac{V}{W_g} = \frac{V^*}{W_g^*}, \quad (6.21)$$

где

V, V^* (м^3) – объемы модели и натурального помещения соответственно;

W_g, W_g^* ($\text{м}^3/\text{с}$) – объемные расходы системы противодымной вытяжной вентиляции для модели и натурального помещения соответственно.

Из соотношения (6.21) с учетом физических размеров модели помещения (рисунок 6.6) получим

$$W_g = 0,704 \cdot \frac{W_g^*}{V^*}. \quad (6.22)$$

Подставляя (6.22) в (6.20), для коэффициента k_3 регрессионного уравнения (6.13) получим выражение

$$k_3 = 89,68 \frac{W_g^*}{V^*} - 3 = 89,68 \frac{W_g}{V} - 3. \quad (6.23)$$

Аналогично выполнено масштабирование коэффициентов k_3 , k_6 в регрессионном уравнении (6.11), которое описывает динамику удельной массовой скорости выгорания твердых горючих материалов с учетом времени включения и объемного расхода системы противодымной вытяжной вентиляции.

6.5. Аналитические зависимости, описывающие динамику развития ОФП с учетом предложенных регрессионных уравнений

В главе 4 предложены аналитические зависимости по определению критического времени эвакуации при пожаре с помощью интегральной математической модели Ю.А. Кошмарова [41]. В главе 5 на базе этой же модели получены численные результаты с учетом работы противодымной вытяжной вентиляции. В данном разделе с учетом некоторых принятых допущений в начальной стадии пожара, получим аналитические зависимости, описывающие законы изменения основных параметров газовой среды при условии функционирования системы противодымной вытяжной вентиляции с применением полученного выше регрессионного уравнения динамики удельной массовой скорости выгорания жидкости при неустановившемся процессе горения. В качестве основных уравнений примем предложенную в главе 5 уточненную интегральную математическую модель (5.1) – (5.15), в которой выполнен учет работы противодымной вытяжной вентиляции.

Согласно принятой в работах [41, 45] гипотезе, в начальной стадии пожара поступление свежего воздуха в горящее помещение отсутствует, имеет место лишь выталкивание газовой смеси сквозь щели и проемы. При этом предполагается, что отношение суммарной площади всех проемов к площади пола помещения не превышает 1%. Так как помещение негерметично, то можно принять величину среднеобъемного давления внутри горящего помещения не

зависящим от времени и равным давлению в наружной среде. Следовательно, в представленных выше дифференциальных уравнениях (5.1) – (5.15) можно положить: $G_a = 0$; $dp_m/d\tau = 0$, $\rho_m T_m = \rho_0 T_0 = const$. С учетом принятых допущений основные разрешающие уравнения принимают вид:

уравнение (5.1) материального баланса газовой среды

$$\frac{d(\rho_m V)}{d\tau} = \psi - G_m - G_g; \quad (6.24)$$

уравнение (5.2) энергетического баланса газовой среды

$$\eta Q_n^p \psi - c_{pm} a_T T_m (G_m + G_g) - Q_{o.k.} = 0; \quad (6.25)$$

уравнение (5.3) баланса оптического количества дыма без учета осаждения частиц дыма на ограждающие конструкции

$$\frac{d(\mu_m V)}{d\tau} = D \psi - \frac{\mu_m k_{\partial}}{\rho_m} (G_m + G_g); \quad (6.26)$$

уравнение (5.4) баланса массы кислорода

$$\frac{d(\rho_m^{O_2} V)}{d\tau} = k_{O_2} \frac{\rho_m^{O_2}}{\rho_m} (G_m + G_g) - L_{O_2} \psi \eta; \quad (6.27)$$

уравнение (5.5) материального баланса токсических продуктов горения

$$\frac{d(\rho_m^{m.z.} V)}{d\tau} = L_{m.z.} \psi \eta - k_{m.z.} \frac{\rho_m^{m.z.}}{\rho_m} (G_m + G_g). \quad (6.28)$$

Начальная стадия развития пожара происходит в течение относительно небольшого промежутка времени. В связи с этим некоторые параметры можно считать постоянными, в частности: D (Нп·м²/кг) – дымообразующую способность горючего материала; η – коэффициент полноты сгорания; c_{pm} (Дж/кг·К) – удельную изобарную теплоемкость газовой среды; R (Дж/кг·К) – газовую постоянную, а также V (м³) – объем горящего помещения.

В начальной стадии пожара можно принять постоянным отношение теплового потока, поглощаемого ограждающими конструкциями, к тепловыделению в процессе горения

$$\frac{Q_{o.k.}}{\eta Q_H^p \psi} = \varphi = const ,$$

где φ – коэффициент теплопотерь.

Тогда уравнение (6.25) запишется в виде:

$$\eta Q_H^p \psi (1 - \varphi) - c_{pm} T_m (G_m + G_e) = 0. \quad (6.29)$$

Последнее алгебраическое равенство позволяет получить выражение для массового расхода газов, выталкиваемых через естественную вентиляцию

$$G_m = \frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi)}{c_{pm} T_m} \psi - G_e. \quad (6.30)$$

При этом принимается, что массовый расход противодымной вытяжной вентиляции в течение всего периода начальной стадии развития пожара равен своему начальному значению

$$G_e = \rho_0 W_e.$$

С учетом принятого выше условия $\rho_m T_m = \rho_0 T_0$ уравнение (6.30) преобразуется к виду

$$G_m = \frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi)}{c_{pm} \rho_0 T_0} \psi \rho_m - G_e. \quad (6.31)$$

Подставляя последнее равенство в уравнения (6.24), (6.26) - (6.28), приходим к уравнениям вида

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \psi \left[1 - \frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi)}{c_{pm} \rho_0 T_0} \rho_m \right], \quad (6.32)$$

$$V \frac{d\mu_m}{d\tau} = \psi \left[D - \frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi)}{c_{pm} \rho_0 T_0} \mu_m \right], \quad (6.33)$$

$$V \frac{d\rho_m^{O_2}}{d\tau} = -\psi \eta \left[L_{O_2} + \frac{Q_H^p (1 - \varphi)}{c_{pm} \rho_0 T_0} \rho_m^{O_2} \right], \quad (6.34)$$

$$V \frac{d\rho_m^{m.z.}}{d\tau} = \psi \eta \left[L_{m.z.} - \frac{Q_H^p (1 - \varphi)}{c_{pm} \rho_0 T_0} \rho_m^{m.z.} \right]. \quad (6.35)$$

Полученная в результате система дифференциальных уравнений не является связанной, что позволяет находить решение каждого из них независимо от остальных.

Исходя из фактических значений величин, входящих в отношение $\eta Q_n^p (1 - \varphi) \rho_m / (c_{pm} \rho_0 T_0)$, можно заключить, что

$$\frac{\eta Q_n^p (1 - \varphi)}{c_{pm} \rho_0 T_0} \rho_m \gg 1,$$

и уравнение (6.32) преобразуется к виду

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = -\psi \frac{\eta Q_n^p (1 - \varphi)}{c_{pm} \rho_0 T_0} \rho_m. \quad (6.36)$$

Проинтегрируем дифференциальное равенство (6.36) в соответствующих пределах, предварительно разделив переменные,

$$\int_{\rho_0}^{\rho_m} \frac{d\rho_m}{\rho_m} = \ln \left(\frac{\rho_m}{\rho_0} \right) = -\frac{\eta Q_n^p (1 - \varphi)}{V c_{pm} \rho_0 T_0} \int_0^{\tau} \psi d\tau. \quad (6.37)$$

Входящий в правую часть последнего равенства интеграл $\int_0^{\tau} \psi d\tau$ определяет массу жидкости, сгоревшей к моменту времени τ :

$$\int_0^{\tau} \psi d\tau = M_{\tau}. \quad (6.38)$$

Подставляя в интегральное равенство (6.38) полученное выше уравнение регрессии (6.11) для ψ , получим выражение для сгоревшей за время τ жидкости

$$M_{\tau} = \left[-63,8 \cdot 10^{-8} \cdot \tau^2 + \left(3,17 \frac{W_g}{V} + 0,21 \right) \cdot 10^{-3} \cdot \tau - 0,4 \cdot 10^{-4} \tau^* - \right. \\ \left. - 0,56 \frac{W_g}{V} + 0,043 \right] \cdot \tau. \quad (6.39)$$

Из соотношения (6.37) с учетом (6.38) и (6.39) окончательно получим аналитическую зависимость среднеобъемной плотности газовой среды от времени

$$\rho_m = \rho_0 \cdot e^{-M_\tau/B}, \quad (6.40)$$

где $B = \frac{Vc_{pm}\rho_0 T_0}{\eta Q_n^p (1-\varphi)}$ – формальное обозначение размерного комплекса (кг),

зависящего от входящих в него величин.

С учетом принятого выше равенства $\rho_m T_m = \rho_0 T_0$ можно получить аналитическую зависимость среднemasсовой температуры газовой среды от времени, аналогичную по структуре (6.40),

$$T_m = T_0 \cdot e^{-M_\tau/B}. \quad (6.41)$$

При определении аналитической зависимости среднеобъемной концентрации дыма в газовой среде выполним некоторые преобразования в уравнении (6.33), после чего проинтегрируем в соответствующих пределах:

$$\frac{d\mu_m}{1 - \frac{V}{B \cdot D} \mu_m} = \frac{D}{V} \psi d\tau;$$

$$\int_{\mu_0}^{\mu_m} \frac{d\mu_m}{1 - \frac{V}{B \cdot D} \mu_m} = \frac{D}{V} \int_0^\tau \psi d\tau;$$

$$\ln \left(\frac{1 - \frac{V}{B \cdot D} \mu_m}{1 - \frac{V}{B \cdot D} \mu_0} \right) = -\frac{M_\tau}{B}.$$

Окончательно аналитическая формула, описывающая зависимость среднеобъемной плотности дыма от времени, принимает вид

$$\mu_m = \frac{B \cdot D}{V} - \left(\frac{B \cdot D}{V} - \mu_0 \right) \cdot e^{-M_\tau/B}. \quad (6.42)$$

Аналогичные математические действия выполним с уравнением (6.34) с целью получения аналитической зависимости от времени среднеобъемной парциальной плотности кислорода газовой среды:

$$\frac{d\rho_m^{O_2}}{1 + \frac{V}{B \cdot \eta \cdot L_{O_2}} \rho_m^{O_2}} = -\frac{\eta \cdot L_{O_2}}{V} \psi d\tau;$$

$$\int_{\rho_0^{O_2}}^{\rho_m^{O_2}} \frac{d\rho_m^{O_2}}{1 + \frac{V}{B \cdot \eta \cdot L_{O_2}} \rho_m^{O_2}} = -\frac{\eta \cdot L_{O_2}}{V} \int_0^\tau \psi d\tau;$$

$$\ln \left(\frac{1 + \frac{V}{B \cdot \eta \cdot L_{O_2}} \rho_m^{O_2}}{1 + \frac{V}{B \cdot \eta \cdot L_{O_2}} \rho_0^{O_2}} \right) = -\frac{M_\tau}{B}.$$

Окончательно аналитическая формула, описывающая зависимость среднеобъемной парциальной плотности кислорода газовой среды от времени, принимает вид

$$\rho_m^{O_2} = \left(\frac{B \cdot \eta \cdot L_{O_2}}{V} + \rho_0^{O_2} \right) \cdot e^{-M_\tau/B} - \frac{B \cdot \eta \cdot L_{O_2}}{V}. \quad (6.43)$$

Наконец, проводим аналогичные математические действия с уравнением (6.36), описывающим процесс образования токсичных газов:

$$\frac{d\rho_m^{m.z.}}{1 - \frac{V}{B \cdot \eta \cdot L_{m.z.}} \rho_m^{m.z.}} = \frac{\eta \cdot L_{m.z.}}{V} \psi d\tau;$$

$$\int_{\rho_0^{m.z.}}^{\rho_m^{m.z.}} \frac{d\rho_m^{m.z.}}{1 - \frac{V}{B \cdot \eta \cdot L_{m.z.}} \rho_m^{m.z.}} = \frac{\eta \cdot L_{m.z.}}{V} \int_0^\tau \psi d\tau;$$

$$\ln \left(\frac{1 - \frac{V}{B \cdot \eta \cdot L_{m.z.}} \rho_m^{m.z.}}{1 - \frac{V}{B \cdot \eta \cdot L_{m.z.}} \rho_0^{m.z.}} \right) = -\frac{M_\tau}{B}.$$

Окончательно аналитическая формула, описывающая зависимость среднеобъемной парциальной плотности токсичных компонентов газовой среды (монооксид и диоксид углерода) от времени, принимает вид

$$\rho_m^{m.z.} = \frac{B \cdot \eta \cdot L_{m.z.}}{V} - \left(\frac{B \cdot \eta \cdot L_{m.z.}}{V} - \rho_0^{O_2} \right) \cdot e^{-M_T/B}. \quad (6.44)$$

Итак, полученные аналитические зависимости (6.40) – (6.44) описывают динамику основных параметров газовой среды в помещении на начальной стадии пожара в условиях функционирования противодымной вытяжной вентиляции. При этом с помощью выражения (6.39), полученного с применением разработанного в ходе экспериментальных исследований регрессионного уравнения (6.11), учитывается время включения системы противодымной вытяжной вентиляции, ее объемный расход, а также неустановившийся процесс горения жидкости.

6.6. Сравнение численных и аналитических результатов по определению критических значений ОФП

В данном разделе выполнено сравнение графических зависимостей для законов изменения с течением времени основных параметров газовой среды, полученных численным решением системы разрешающих уравнений (5.1) – (5.15) (серия № 5) и с помощью аналитических зависимостей (6.40) – (6.44) (серия № 6). Удельная массовая скорость выгорания жидкости при неустановившемся процессе горения с учетом времени включения и объемного расхода системы противодымной вытяжной вентиляции описывается полученным выше регрессионным уравнением (6.11).

Соответствующие результаты представлены на рисунках 6.16 – 6.19 для среднemasсовой температуры, среднеобъемных парциальных плотностей кислорода и токсичных газов (монооксид и диоксид углерода газовой среды).

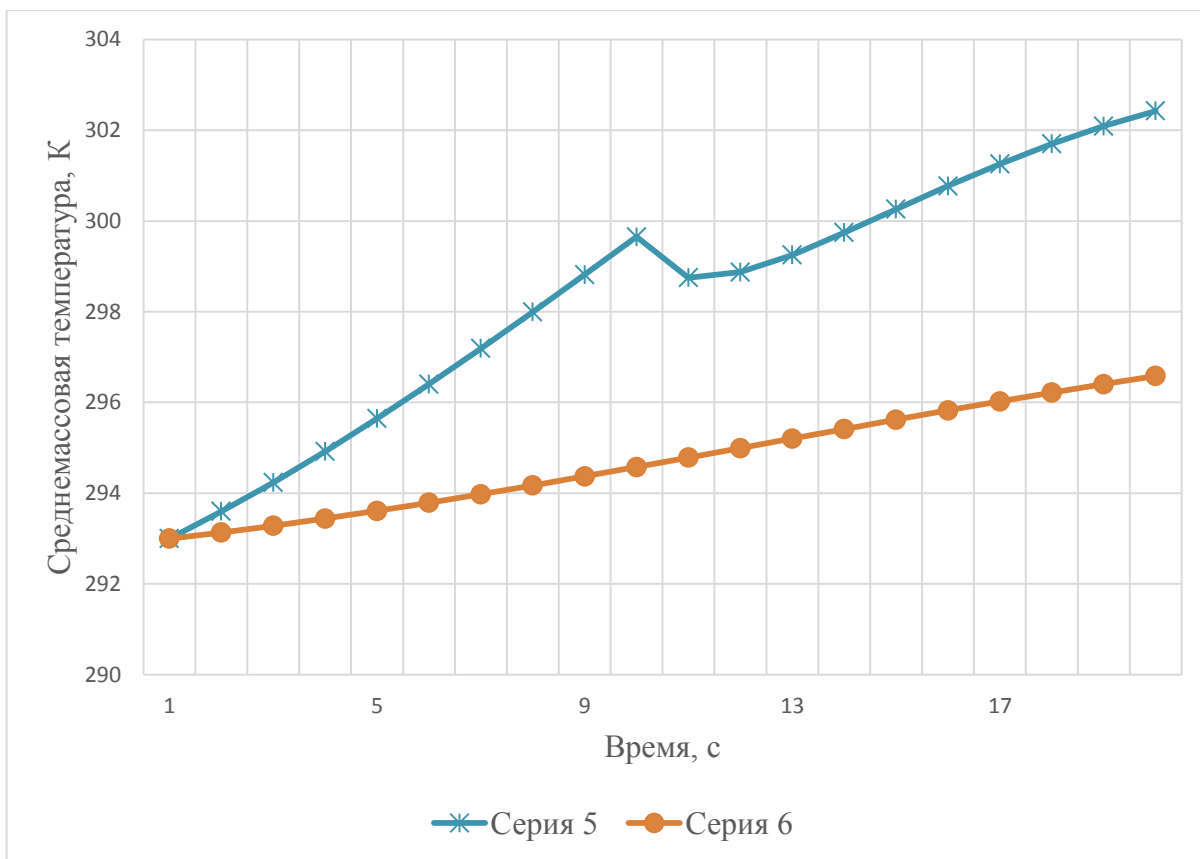


Рисунок 6.16 – Среднемассовая температура газовой среды от времени

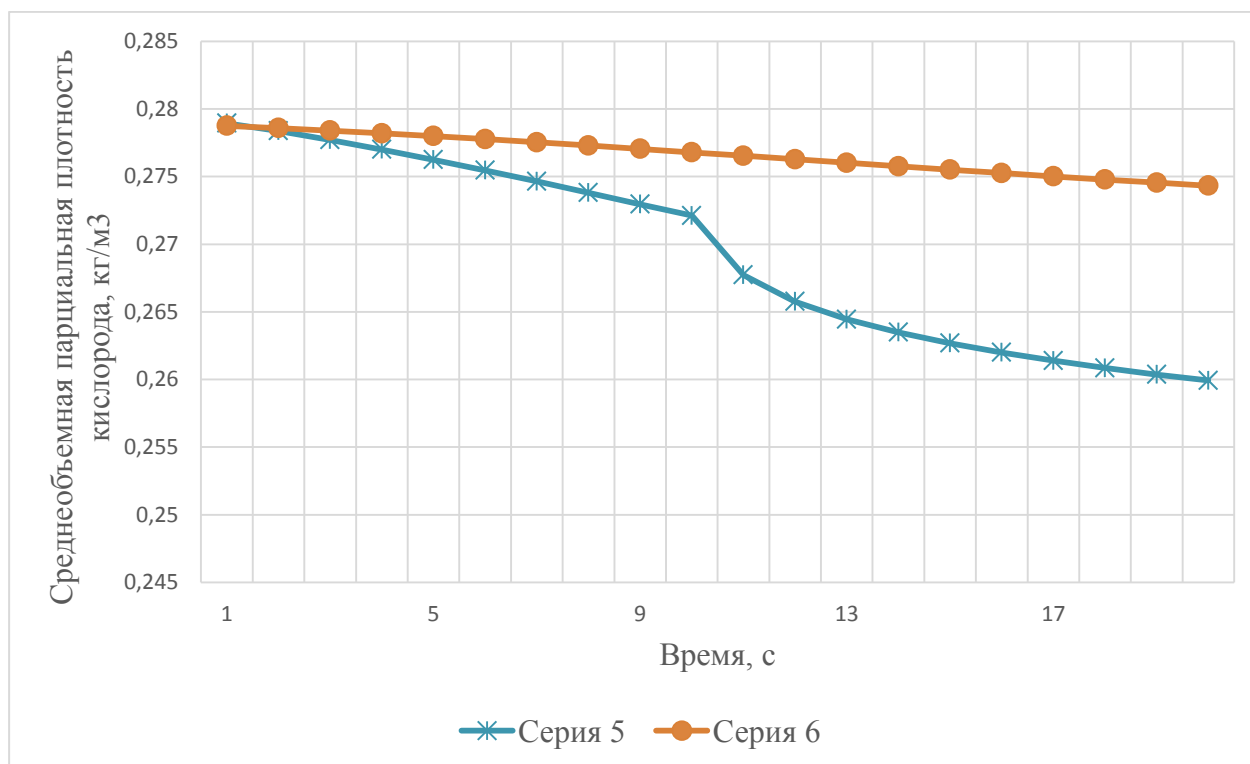


Рисунок 6.17 – Среднеобъемная парциальная плотность кислорода в газовой среде от времени

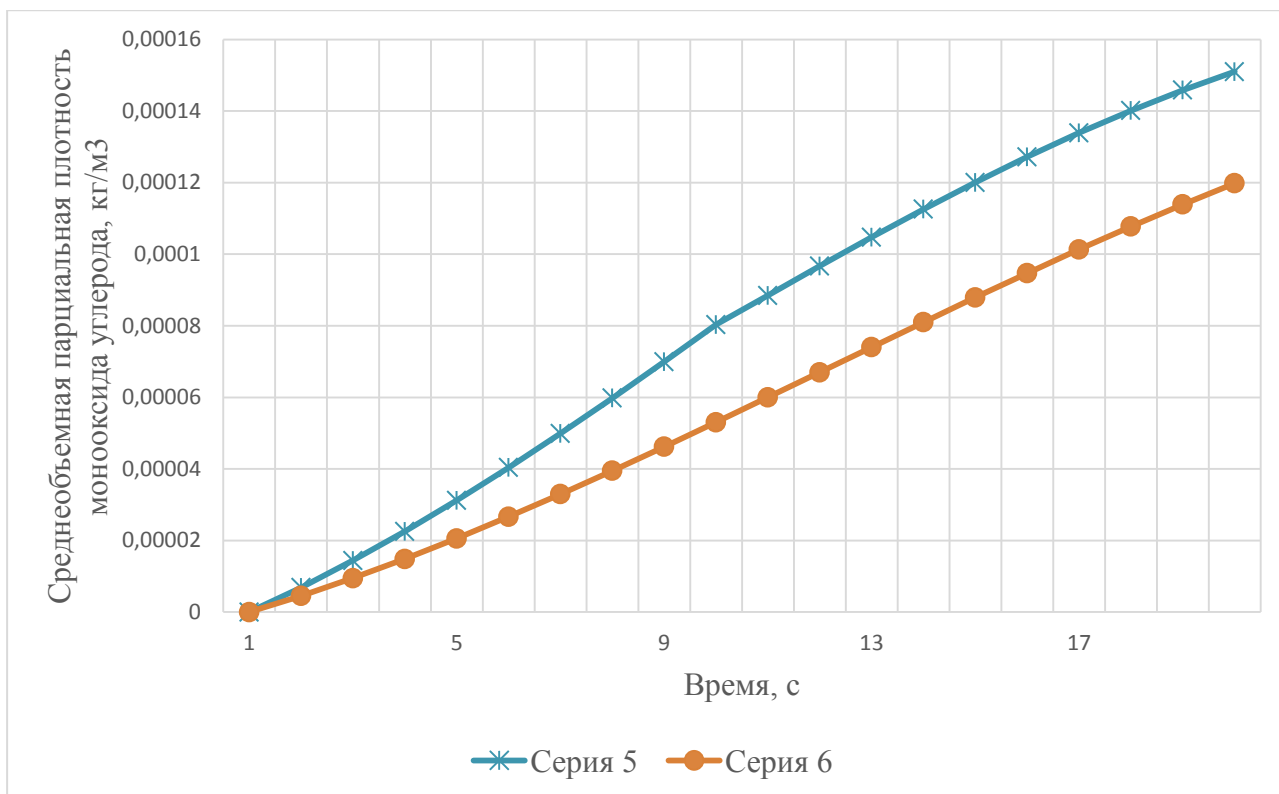


Рисунок 6.18 – Среднеобъемная парциальная плотность монооксида углерода в газовой среде от времени

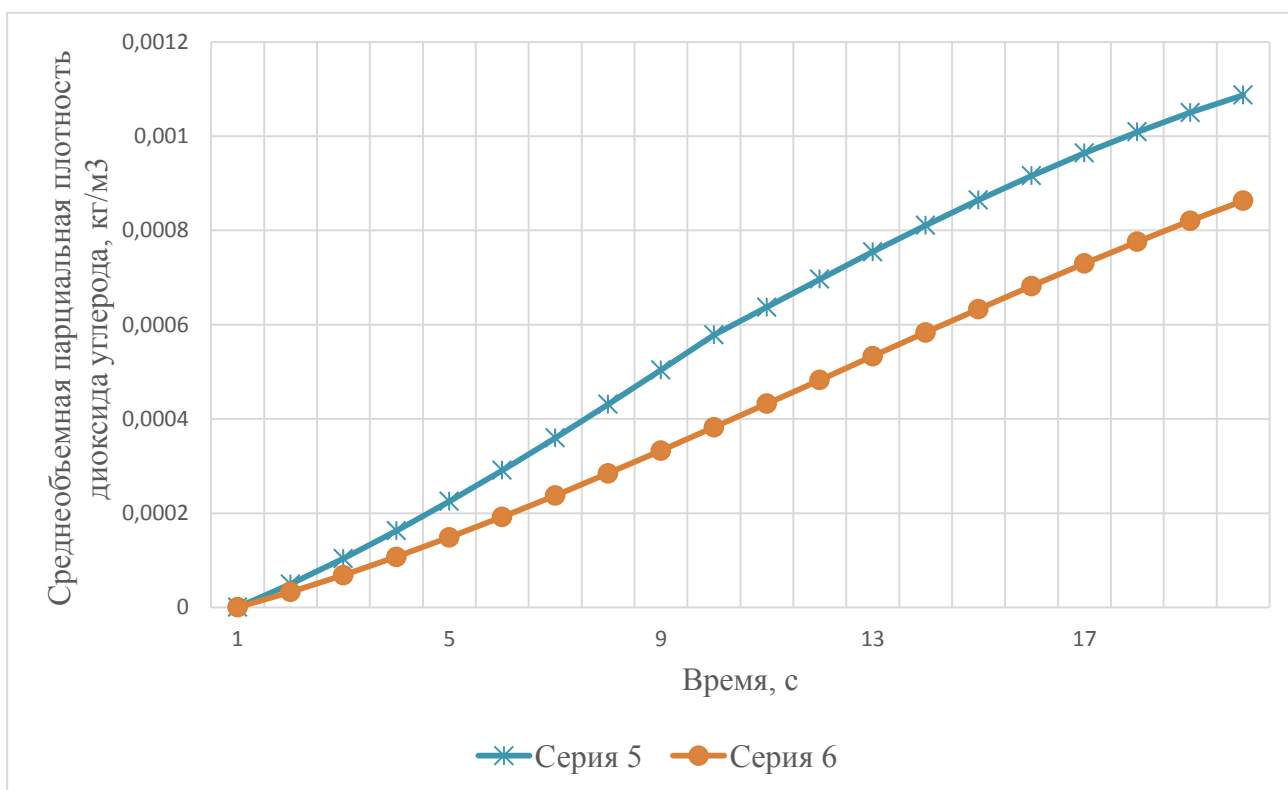


Рисунок 6.19 – Среднеобъемная парциальная плотность диоксида углерода в газовой среде от времени

На начальной стадии развития пожара имеет место удовлетворительная сходимость представленных результатов. Наблюдаемое при увеличении временного интервала расхождение кривых объясняется тем, что при получении аналитических зависимостей (6.40) – (6.44) 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 (6.40) – (6.44), уменьшается.

6.7. Программный комплекс, реализующий представленные математические модели

На базе разработанной интегральной математической модели пожара, учитывающей функционирование системы противодымной вытяжной вентиляции 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.

Входные данные для расчета включают в себя следующие группы.

1. Исходные данные для помещения: длина, ширина, высота, а также коэффициент теплопотерь ограждающих конструкций.
2. Исходные данные пожарной нагрузки: горение жидкости или твердого материала, распространение пламени по кругу или линейно, низшая теплота сгорания, линейная скорость пламени, удельная массовая скорость выгорания, дымообразующая способность, потребление кислорода, выделение токсичных продуктов горения (монооксид и диоксид углерода, хлористый водород), коэффициент полноты горения.
3. Начальные условия: плотность газовой среды, температура, удельная

изобарная теплоемкость и парциальная плотность кислорода газовой среды.

4. Временные факторы: продолжительность пожара, шаг временного интервала.

Выходные данные представляют собой совокупность значений для опасных факторов пожара:

- критическая продолжительность пожара;
- среднemasсовая температура;
- среднеобъемная парциальная плотность кислорода;
- среднеобъемная парциальная плотность монооксида углерода;
- среднеобъемная парциальная плотность диоксида углерода;
- среднеобъемная парциальная плотность хлористого водорода;
- среднеобъемная оптическая плотность.

В главном окне программы представлены предельно допустимые значения ОФП.

Разработанный программный комплекс позволяет моделировать протекание пожаров при разнообразных условиях и сокращает 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. Удобный интерфейс обеспечивает простой ввод исходных данных и получение на выходе исчерпывающей информации об опасных факторах пожара, непрерывно меняющих свои значения во время пожара.

Визуальные отображения главного окна разработанного программного комплекса в режиме ввода данных и отображения основных результатов счета представлены на рисунках 6.20 и 6.21.

Asimf-S.O.K.S

Воронежский государственный
архитектурно-строительный университет
кафедра пожарной и промышленной безопасности



1. Исходные данные помещения

Длина, м: a = Коэффициент теплопотерь: Fi =

Ширина, м: b =

Высота, м: h =

2. Исходные данные пожарной нагрузки

2.1 Выберите сценарий горения и введите необходимые данные

Горение жидкости с установившейся скоростью

 Радиус разлива, м: R =

Горение жидкости с неустановившейся скоростью

 Радиус разлива, м: R =

 Время стабилизации горения, с: tst =

Круговое распространение пожара по твердому горючему веществу

Линейное распространение пожара по твердому горючему материалу

 Ширина фронта пламени, м: bf =

2.2 Выберите типовую пожарную нагрузку из списка

не выбрано

Низшая теплота сгорания, МДж/кг: QnR = -

Линейная скорость пламени, м/с: V1 = -

Удельная массовая скорость выгорания, кг/м² с: PSlud = -

Дымообразующая способность, Нп м²/кг: D = -

Потребление кислорода (O₂), кг/кг: LO₂ = -

Выделение газа:

 диоксид углерода (CO₂), кг/кг: LCO₂ = -

 монооксид углерода (CO), кг/кг: LCO = -

 хлористый водород (HCL), кг/кг: LHCL = -

2.3 Коэффициент полноты горения, ETA

3. Начальные условия

Начальная плотность газовой среды, кг/м³: Ro0 =

Начальная температура газовой среды, К: T0 =

Удельная изобарная теплоемкость газовой среды, МДж/кг: cp =

Начальная парциальная плотность кислорода газовой среды, кг/м³: RoO₂ =

Изменить начальные условия

4. Введите значение времени моделирования

Время пожара, с: t =

Шаг времени, с: tstep =

Результаты расчетов

Объем помещения, м ³	-
Площадь разлива горячей жидкости, м ²	-
Размерный параметр - A, учитывающий удельную массовую скорость выгорания горючего материала и площадь пожара, кг/с ⁿ : A =	-
Показатель степени, учитывающий изменение во времени массы выгорающего материала: n =	-
Размерный параметр - B, зависящий от теплоты сгорания материала и объема помещения, кг: B =	-
Критическая продолжительность пожара, с:	-
- среднemasовая температура	-
- среднеобъемная парциальная плотность кислорода	-
- среднеобъемная парциальная плотность монооксида углерода	-
- среднеобъемная парциальная плотность диоксида углерода	-
- среднеобъемная парциальная плотность хлористого водорода	-
- среднеобъемная оптическая плотность	-

Предельно допустимые значения ОФП

Температура, К:	343
Парциальная плотность, кг/м ³ :	
- кислорода	0.226
- монооксида	0.00116
- диоксида углерода	0.11
- хлористого водорода	0.000023
Оптическая	0.119

Выполнить расчет

Разработчики:
И. В. Ситников, А. А. Однолько, С. А. Колодяжный, Е. А. Сушко

Рисунок 6.20 – Главное окно программы в режиме ввода данных

Asimf-S.O.K.S

Воронежский государственный
архитектурно-строительный университет
кафедра пожарной и промышленной безопасности



1. Исходные данные помещения

Длина, м: a = Коэффициент теплопотерь: Fi =
Ширина, м: b =
Высота, м: h =

2. Исходные данные пожарной нагрузки

2.1 Выберите сценарий горения и введите необходимые данные

Горение жидкости с установившейся скоростью

Радиус разлива, м: R =

Горение жидкости с неустановившейся скоростью

Радиус разлива, м: R =

Время стабилизации горения, с: tst =

Круговое распространение пожара по твердому горючему веществу

Линейное распространение пожара по твердому горючему материалу

Ширина фронта пламени, м: bf =

2.2 Выберите типовую пожарную нагрузку из списка

7. Кабинет; мебель+бумага (0,75+0,25)

Низшая теплота сгорания, МДж/кг: QnR = 14.002

Линейная скорость пламени, м/с: VI = 0.042

Удельная массовая скорость выгорания, кг/м² с: PSlud = 0.0129

Дымообразующая способность, Нп м²/кг: D = 53

Потребление кислорода (O₂), кг/кг: LO₂ = 1.161

Выделение газа:

диоксид углерода (CO₂), кг/кг: LCO₂ = 0.642

монооксид углерода (CO), кг/кг: LCO = 0.0317

хлористый водород (HCL), кг/кг: LHCL = 0

2.3 Коэффициент полноты горения, ETA

3. Начальные условия

Начальная плотность газовой среды, кг/м³: Ro0 =

Начальная температура газовой среды, К: T0 =

Удельная изобарная
теплоемкость газовой среды, МДж/кг: ср =

Начальная парциальная плотность
кислорода газовой среды, кг/м³: RoO₂ =

Изменить начальные условия

4. Введите значение времени моделирования

Время пожара, с: t =

Шаг времени, с: tstep =

Результаты расчетов

Объем помещения, м ³	400
Площадь разлива горячей жидкости, м ²	-
Размерный параметр - A, учитывающий удельную массовую скорость выгорания горючего материала и площадь пожара, кг/с ⁴ n: A =	2.38934e-05
Показатель степени, учитывающий изменение во времени массы выгорающего материала: n =	3
Размерный параметр - B, зависящий от теплоты сгорания материала и объема помещения, кг: B =	23.8566
Критическая продолжительность пожара, с:	
- среднemasовая температура	53.983
- среднеобъемная парциальная плотность кислорода	55.3568
- среднеобъемная парциальная плотность монооксида углерода	108.507
- среднеобъемная парциальная плотность диоксида углерода	не опасно
- среднеобъемная парциальная плотность хлористого водорода	не опасно
- среднеобъемная оптическая плотность	33.7122

Предельно допустимые значения ОФП

Температура, К:	343
Парциальная плотность, кг/м ³ :	
- кислорода	0.226
- монооксида	0.00116
- диоксида углерода	0.11
- хлористого водорода	0.000023
Оптическая	0.119

Выполнить расчет

Разработчики:
И. В. Ситников, А. А. Однoлькo, С. А. Колодяжный, Е. А. Сушко

Рисунок 6.21 – Главное окно программы в режиме отображения основных результатов

6.8. Выводы по шестой главе

1. Проведены экспериментальные исследования динамики удельной массовой скорости выгорания жидкости и твердых горючих материалов с учетом работы противодымной вытяжной вентиляции, времени ее включения и объемного расхода при неустановившемся процессе горения жидкости. 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 эксперимента.

2. Опираясь на результаты проведенного экспериментального исследования, получены уравнения регрессии, определяющие закон изменения удельной массовой скорости выгорания жидкости и твердых горючих материалов с учетом времени включения системы противодымной вытяжной вентиляции и ее объемного расхода. Выполнен дисперсионный анализ и проверка значимости полученных коэффициентов регрессионных уравнений. Приводится сравнение расположения экспериментальных точек с регрессивной кривой. При переходе от физической модели к натурному объекту в масштабировании коэффициентов регрессионных уравнений применены методы теории подобия.

3. С учетом разработанных регрессионных уравнений предложены аналитические зависимости для определения значений опасных факторов пожара в условиях работы системы противодымной вытяжной вентиляции, в случае горения жидкости при неустановившемся процессе ее горения. 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.

4. В среде пакета Matlab на базе разработанной интегральной математической модели пожара, учитывающей функционирование системы противодымной вытяжной вентиляции, 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.

ГЛАВА 7. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ

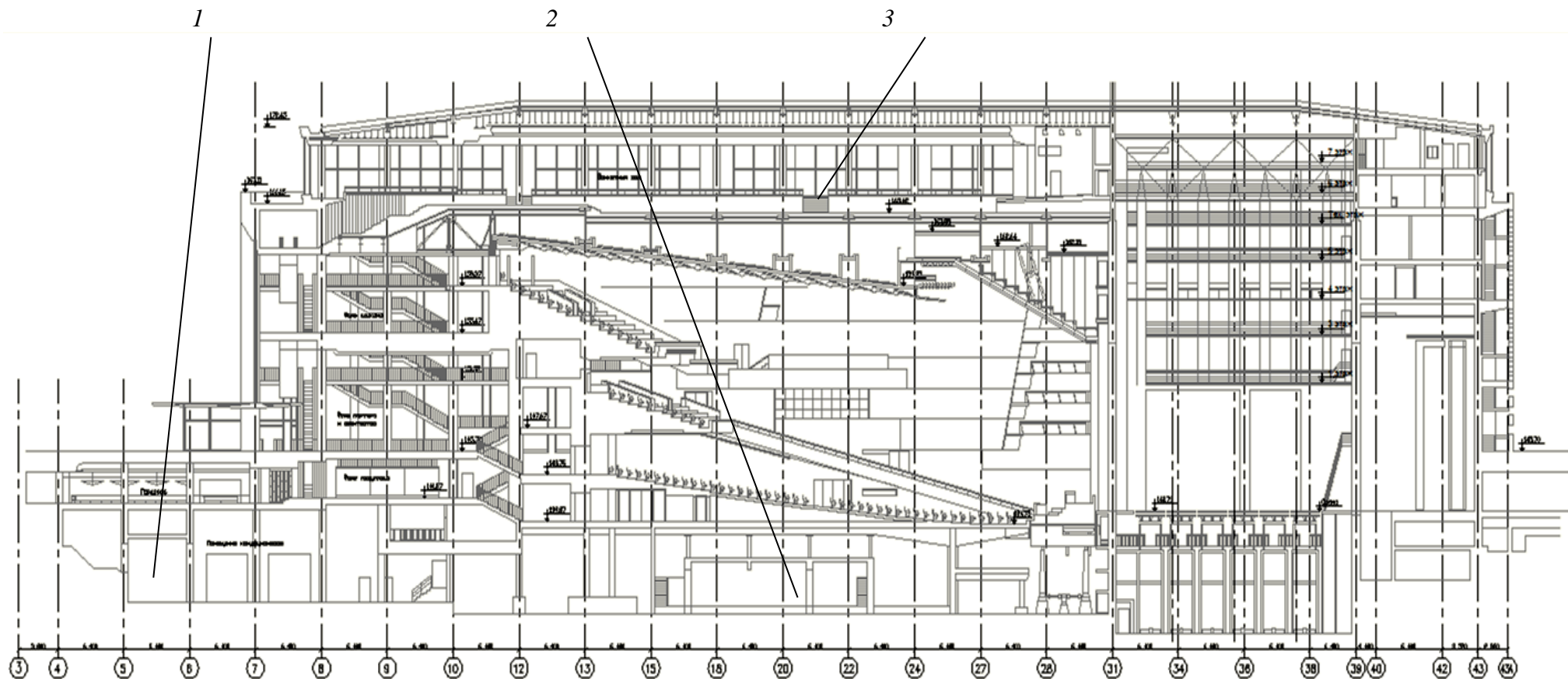
7.1. Расчет пожарных рисков для реконструкции Государственного Кремлевского Дворца с учетом работы СДУ

В первоначальном проекте реконструкции ГКД (за исключением административно-бытовой части здания) присутствовало большое количество отступлений от нормативных документов пожарной безопасности, наиболее важным из которых являлось отсутствие в здании систем противодымной вентиляции. Поэтому был проведен расчет пожарных рисков для общественной части здания (рисунок 7.1).

В качестве наиболее опасных сценариев пожара принимаем расчетные ситуации, представленные в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Наиболее опасные сценарии развития пожара в ГКД

№ сценария и характеристика развития пожара	Расчетное количество людей	Количество МГН	Наименование пожарной нагрузки в помещении [41]
сценарий_01 первичный очаг загорания находится в зрительном зале на отметке 139,85 в осях 20-22/63-69, зрительный зал заполнен полностью; ОФП распространяются по зрительному залу, блокируя пути эвакуации; блокируется один эвакуационный выход в осях 20-22/55-69 из партера зрительного зала и балкона паркетного фойе зрительного зала в осях 12-15/63-69	5000	М4 – 15 М1-3 - 98	Здание 1-2 степени огнестойкости
сценарий_02 первичный очаг загорания находится в гардеробе на отметке 141,38 в осях 3-5/55-63; ОФП распространяются по гардеробу, блокируя пути эвакуации; блокируется один эвакуационный выход из фойе гардероба в осях 7-8/53-55; гардероб отделен от общего пространства фойе партера и балконов противопожарными шторами по оси 7, опускающимися при пожаре на уровень 2 м от пола	6000 - зрительный зал	М4 – 15 М1-3 - 98	Верхняя одежда



1 – гардероб; 2 – зрительный зал; 3 – зал приемов

Рисунок 7.1 – Схема общественной части здания ГКД

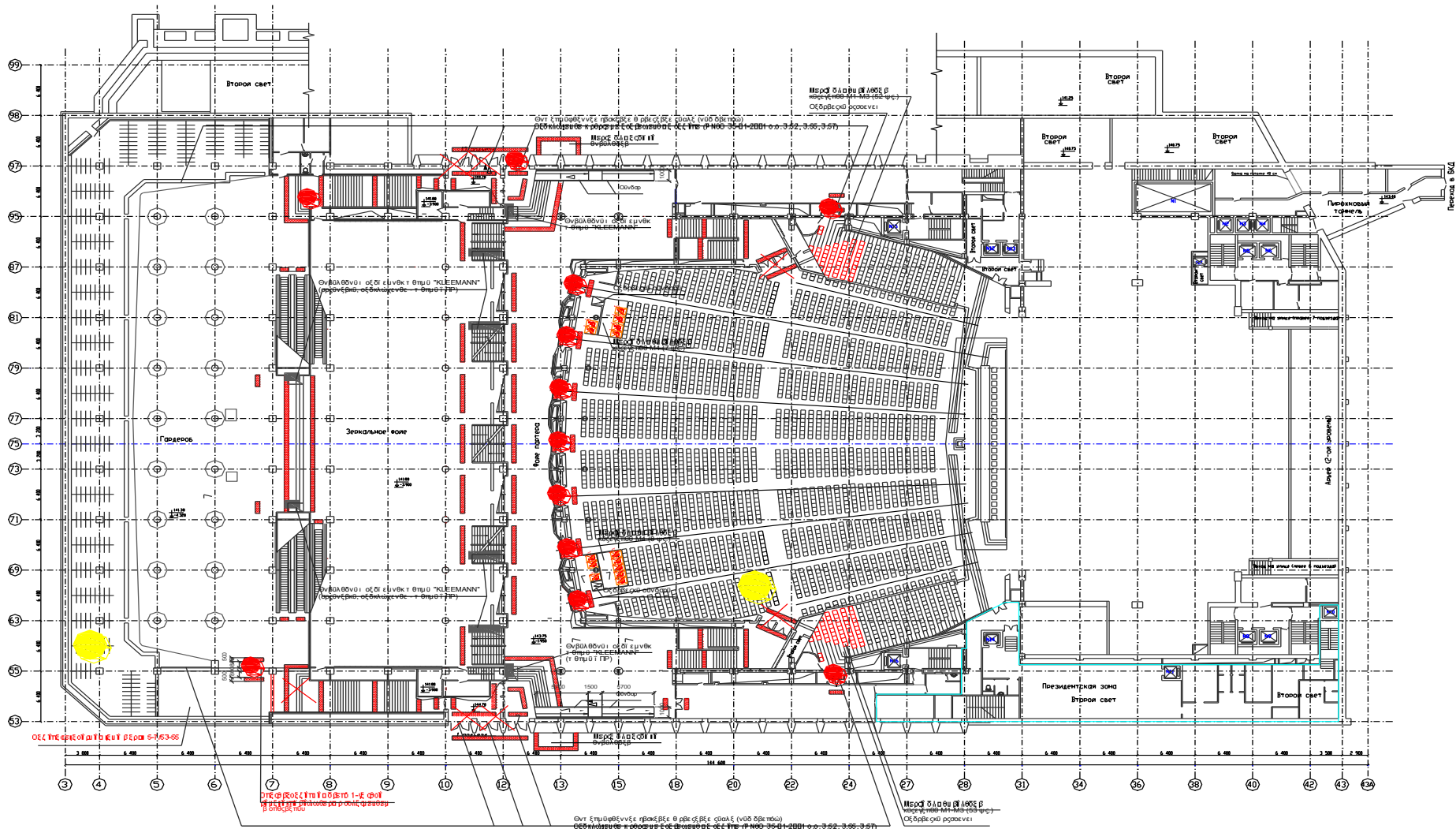


Рисунок 7.2 – Места возникновения начальных очагов пожара (обозначено желтым) при сценариях _01 и _02. Красным цветом обозначены места расположения эвакуационных выходов

Сценарий развития пожара на сцене зрительного зала не рассматривается, так как в этом случае сцена отделена от зрительного зала противопожарными шторами. Численные эксперименты выполнены с использованием программы для ЭВМ [70].

На рисунке 7.2 на планах этажей показаны места возникновения начальных очагов пожара, а также обозначены места расположения контрольных точек (эвакуационных выходов).

Характерные поля параметров газовой среды помещения в продольном сечении зрительного зала через 360 с от начала пожара приведены на рисунке 7.3 (сценарий_01).

Характерные поля параметров газовой среды помещения в продольном сечении гардероба через 300 с от начала пожара показаны на рисунке 7.4 (сценарий_02).

На рисунке 7.5 представлены поля скорости в плоскости, параллельной перекрытию гардероба и отстоящей от него на расстояние 0,2 м, через 900 с от начала пожара (сценарий_02).

При пожаре в гардеробе (сценарий_02) анализ результатов расчета показал, что использование системы механического дымоудаления из гардероба и противопожарных штор позволяет полностью предотвратить распространение опасных факторов пожара в осях 7-31 в течение минимум 15 мин. Продукты горения не поступают на эвакуационные выходы в подъездах 1 и 13 и не попадают в открытые эскалаторные проемы в осях 7-8/63-71 и 7-8/79-87. Таким образом, не происходит блокирования путей эвакуации людей (в том числе М1-М3 и М4) из зрительного зала в течение 15 мин. от начала пожара.

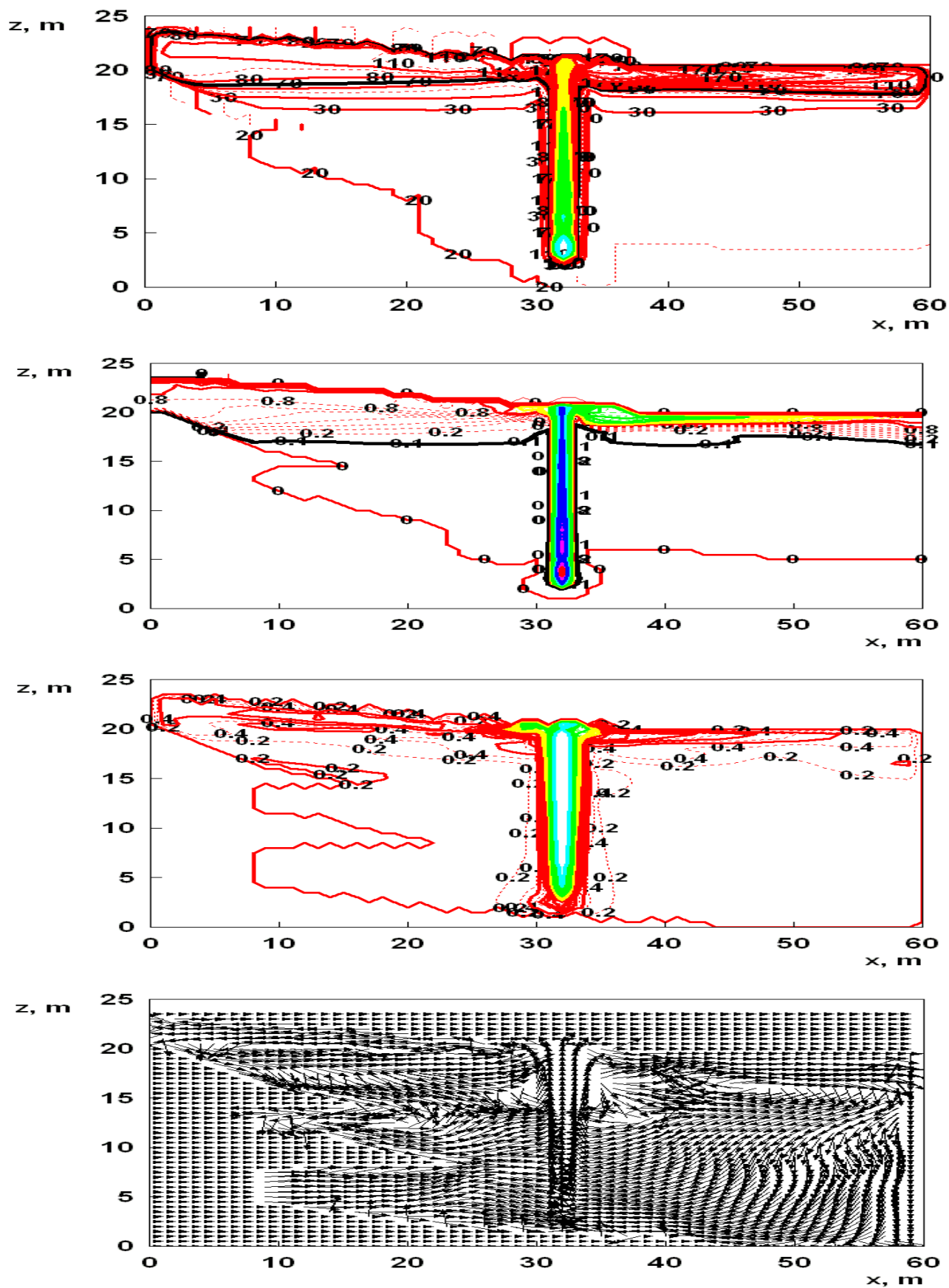


Рисунок 7.3 – Поля параметров газовой среды помещения (температура, оптическая плотность дыма, скорость и направления течения) в продольном сечении зрительного зала через 360 с от начала пожара (сценарий_01)

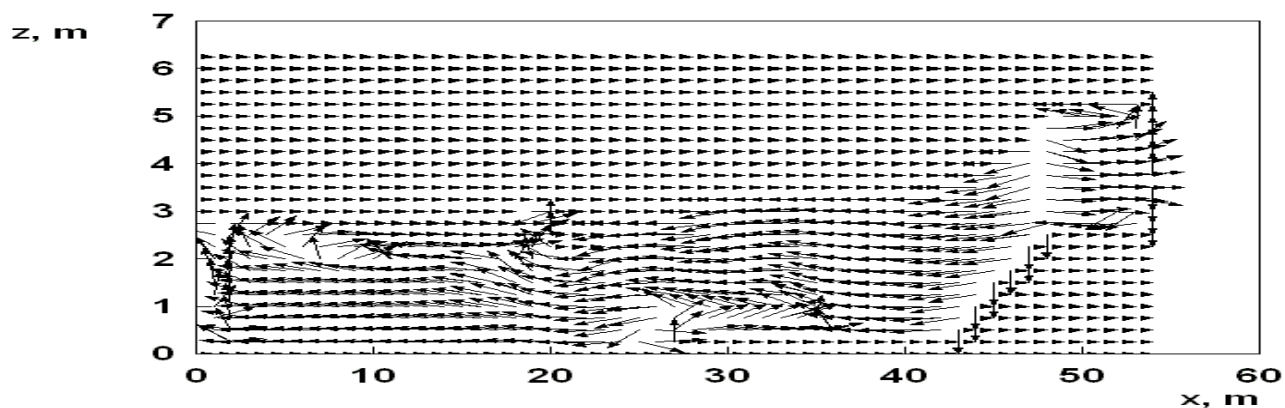
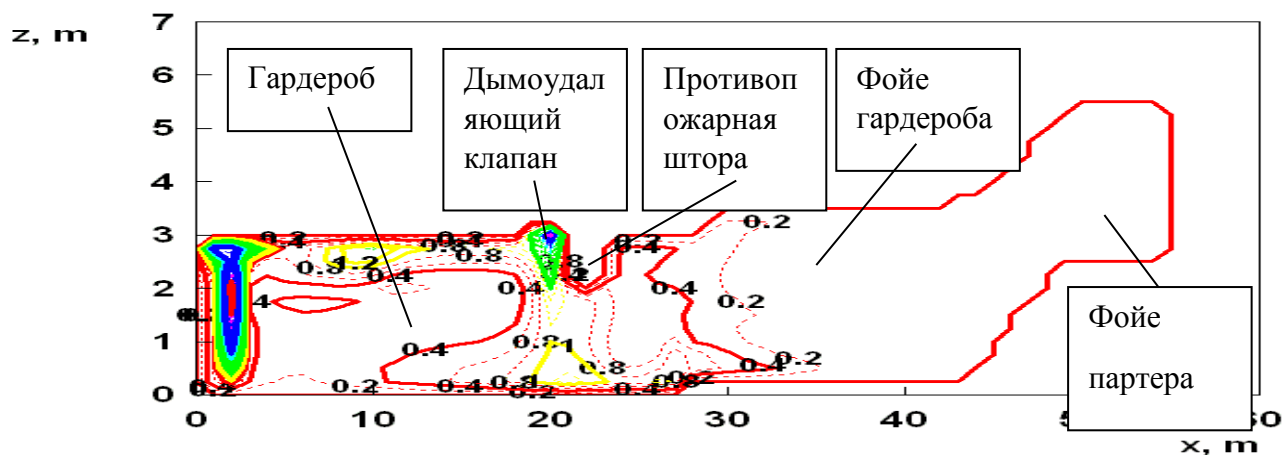
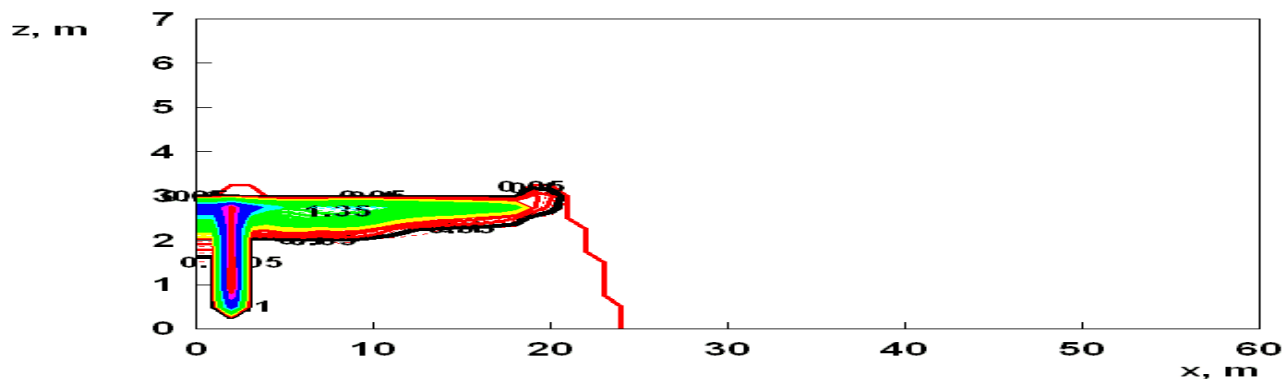
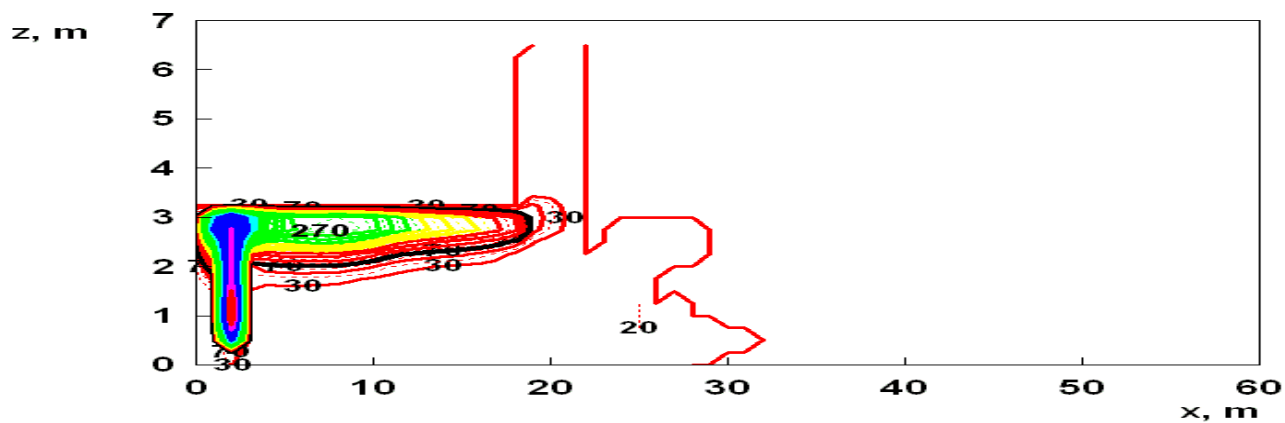


Рисунок 7.4 – Поля параметров газовой среды помещения (температура, оптическая плотность дыма, скорость и направления течения) в продольном сечении гардероба через 300 с от начала пожара (сценарий_02)

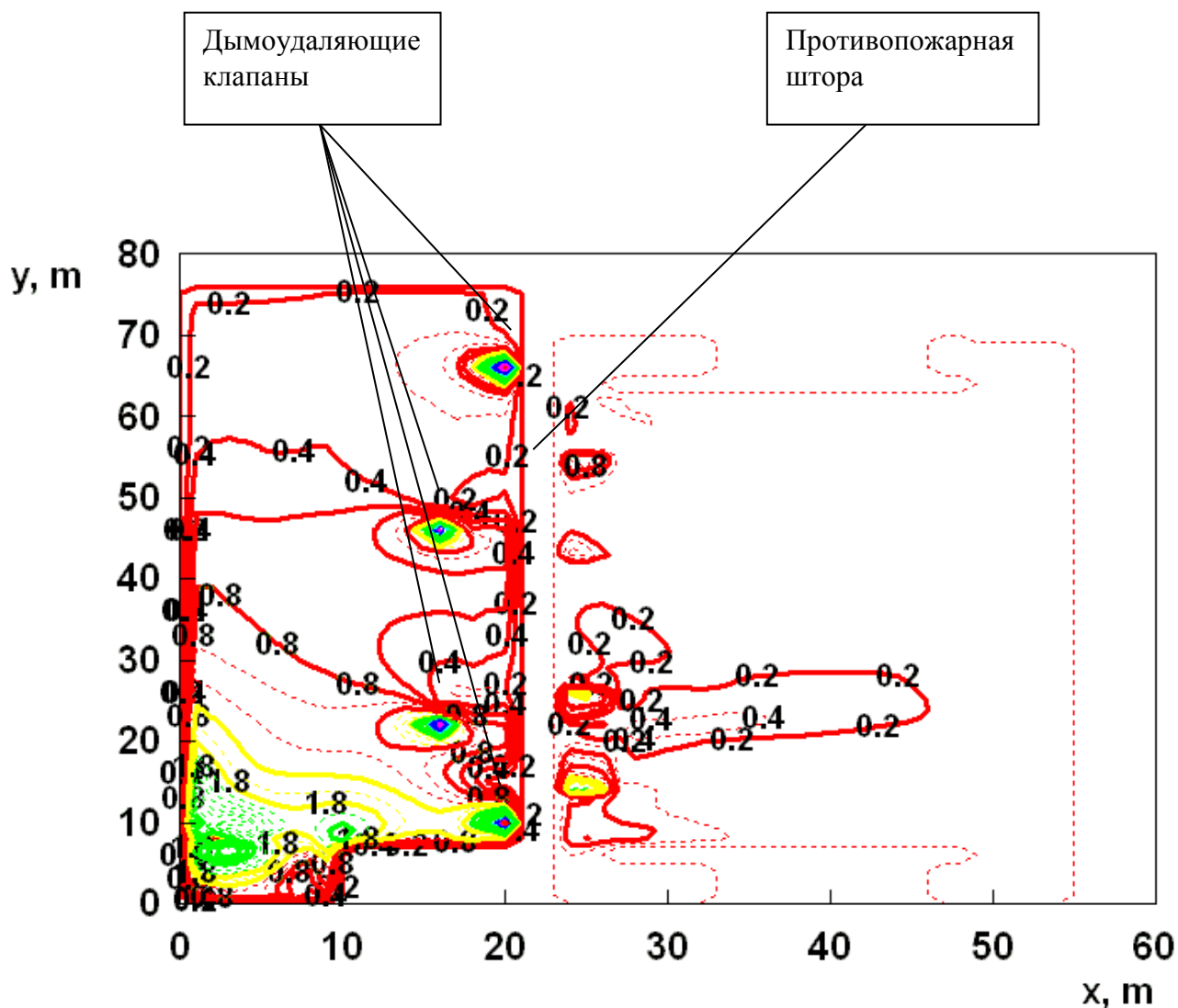


Рисунок 7.5 – Поля скорости в плоскости, параллельной перекрытию гардероба и отстоящей от него на расстояние 0,2 м, через 900 с от начала пожара (сценарий_02)

Проведенные расчеты пожарных рисков показали, что условие безопасной эвакуации людей выполняется только с учетом наличия системы противодымной защиты и пожарные риски не превышают нормативного значения при выполнении следующих противопожарных мероприятий:

- необходима установка системы механического дымоудаления из гардероба в осях 3-7/55-63 с общим расходом 90 000 м³/час и расстановкой 4-х клапанов дымоудаления в соответствии с принятой в выполненных расчетах;

- гардероб в осях 3-7/55-63 необходимо выделить от фойе гардероба противопожарной (противодымной) шторой с пределом огнестойкости Е 60, расположенной вдоль оси 7 и опускающейся при пожаре на высоту 2 м от уровня пола.

7.2. Особенности термогазодинамики пожара в многофункциональном торговом комплексе ООО «МЕТРО Кэш энд Керри»

Здание торгового комплекса включает помещения класса функциональной пожарной опасности Ф3.1, Ф5.1 и Ф5.2.

Пожарная опасность здания характеризуется наличием в помещениях легковоспламеняющихся и горючих веществ (мебель, промышленные товары, электронные приборы, электрические кабели, дерево, резина, различные виды тканей и пластиков), что может привести к быстрому интенсивному горению и невозможности ликвидации пожара персоналом здания.

План 1-го этажа торгового комплекса представлен на рисунке 7.6.

Наиболее опасный сценарий развития пожара происходит в случае, когда одновременно блокируются эвакуационные выходы в осях А/3-8 (на рисунке 7.6 – зачеркнуты). При этом люди, находящиеся в холле и кассовой зоне и остальных частях здания, расположенных вблизи вышеуказанных блокированных эвакуационных выходов, вместе с остальными посетителями эвакуируются через торговый зал наружу.

Численные эксперименты выполнены с использованием программы для ЭВМ [70].

На рисунке 7.6 на плане этажа для рассматриваемого сценария показано место возникновения начального очага пожара (горючая нагрузка - здание 1-2 степени огнестойкости; мебель + ткани [41]), а также обозначены места расположения эвакуационных выходов.

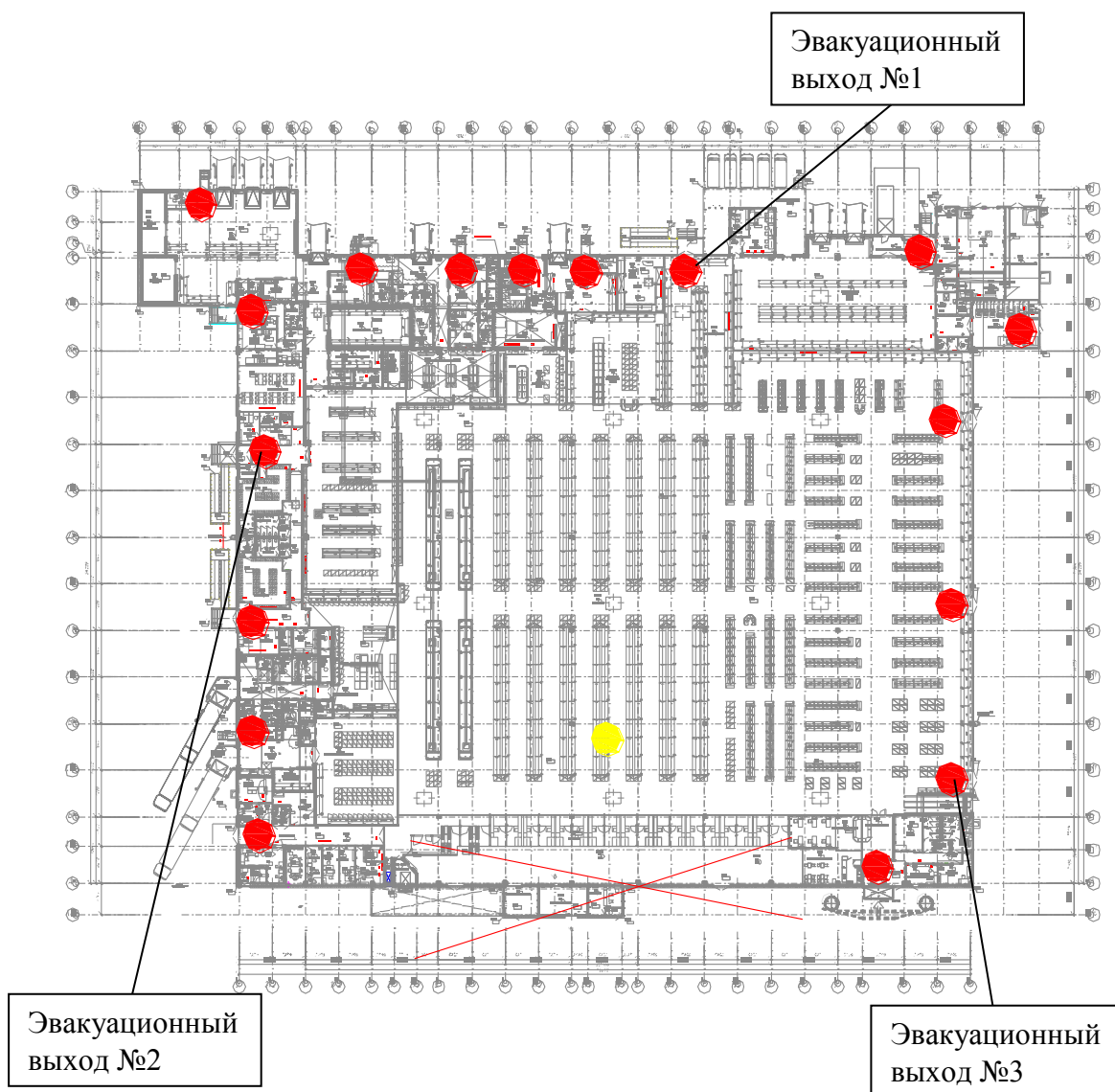


Рисунок 7.6 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено желтым). Красным цветом обозначены места расположения эвакуационных ВЫХОДОВ

На рисунке 7.7 приведены поля параметров газовой среды помещения (температура, оптическая плотность дыма, скорость и направления течения) в поперечном сечении здания через 400 с от начала возгорания.

Поля дальности видимости в плоскости, находящейся на высоте 2 м от пола, через 480, 600, 720 и 840 с от начала возгорания показаны на рисунке 7.8. На рисунках 7.7 и 7.8 следующие обозначения: x , y , z – координаты вдоль длины, ширины и высоты помещения; температура приведена в $^{\circ}\text{C}$, оптическая

плотность дыма дана Нп/м, дальность видимости приведена в м, скорость - в м/с.

Результаты численного моделирования развития пожара показывают, что время блокирования эвакуационного выхода не увеличивается с ростом расстояния от него до источника горения, а определяется особенностями термогазодинамической картины пожара.

Согласно выполненным расчетам сначала блокируется эвакуационный выход №1 (см. рисунок 7.6), расположенный на расстоянии $r=84$ м от источника возгорания. Затем блокируется эвакуационный выход №2 ($r=80$ м), последним по времени – выход №3 ($r=62$ м) (через 5,8 мин. после блокировки выхода №1).

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- с увеличением расстояния от эвакуационного выхода до места возникновения пожара время блокирования эвакуационного выхода ОФП может изменяться как в сторону уменьшения, так и увеличиваться;

- последовательность блокирования ОФП эвакуационных выходов зависит от особенностей термогазодинамической картины пожара, которая определяется расположением источника возгорания и объемно-планировочными решениями помещений.

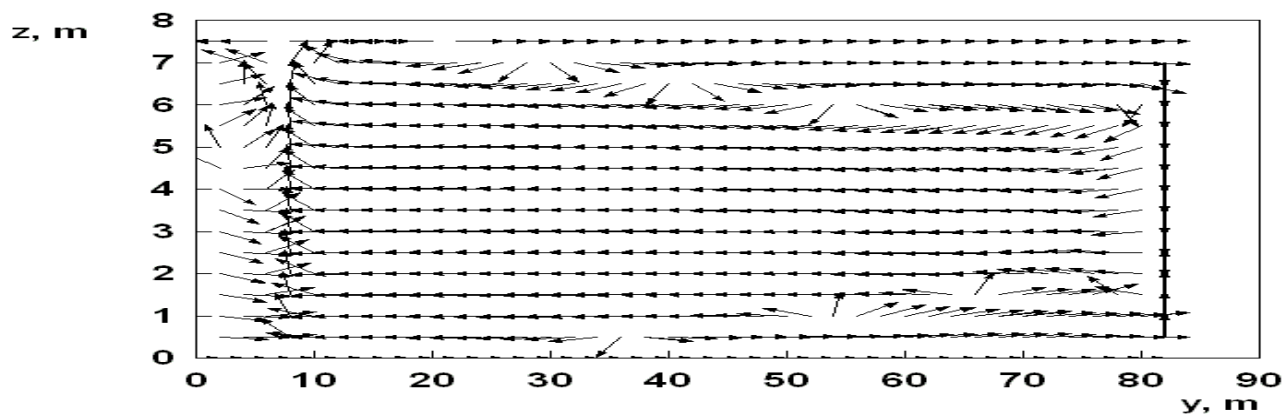
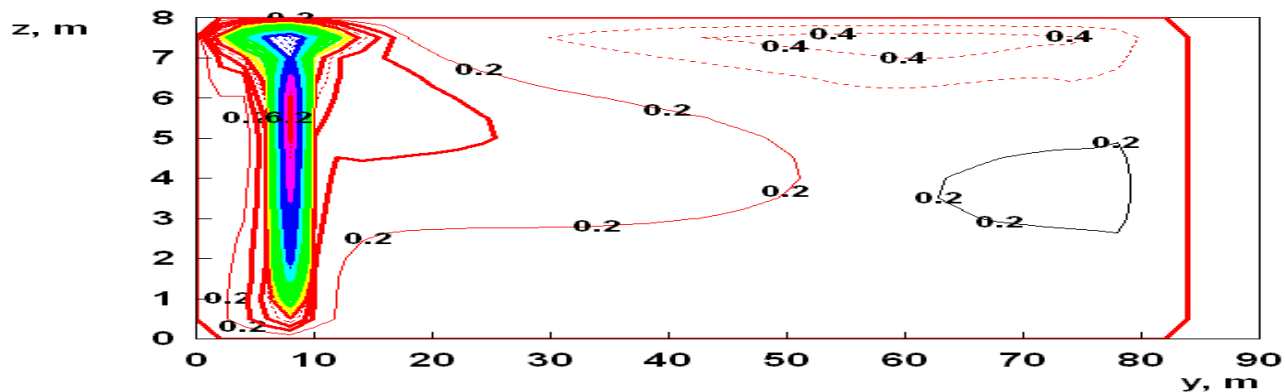
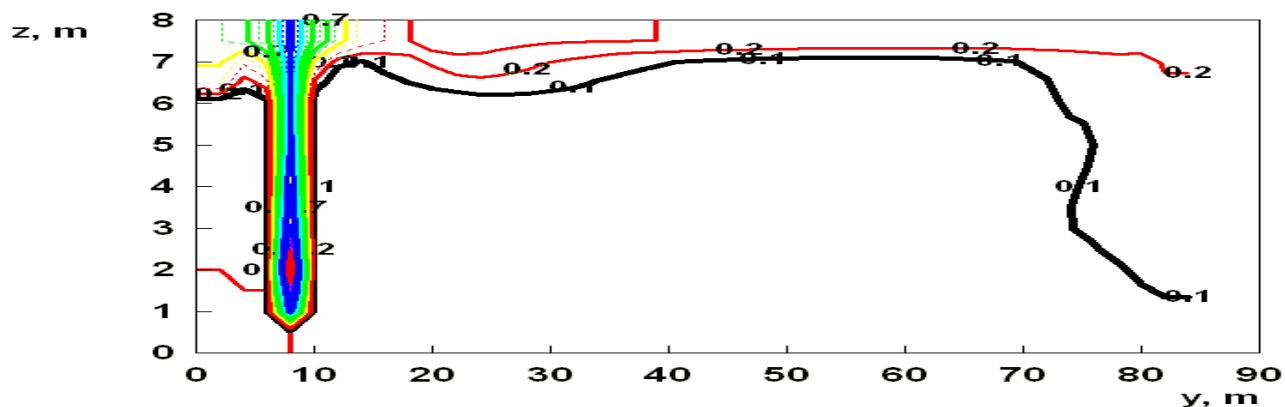
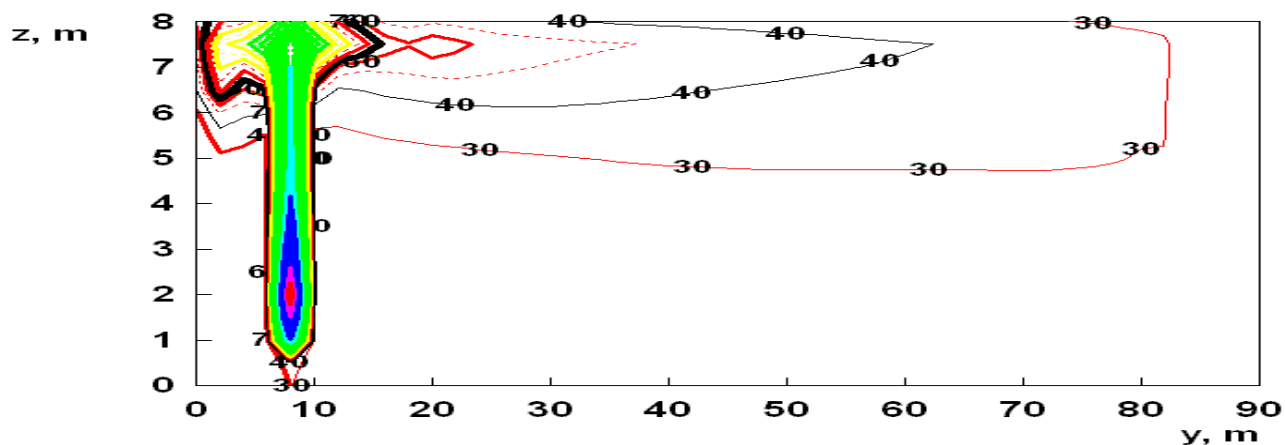


Рисунок 7.7 – Поля параметров газовой среды помещения (температура, оптическая плотность дыма, скорость и направления течения) в поперечном сечении здания через 400 с от начала возгорания

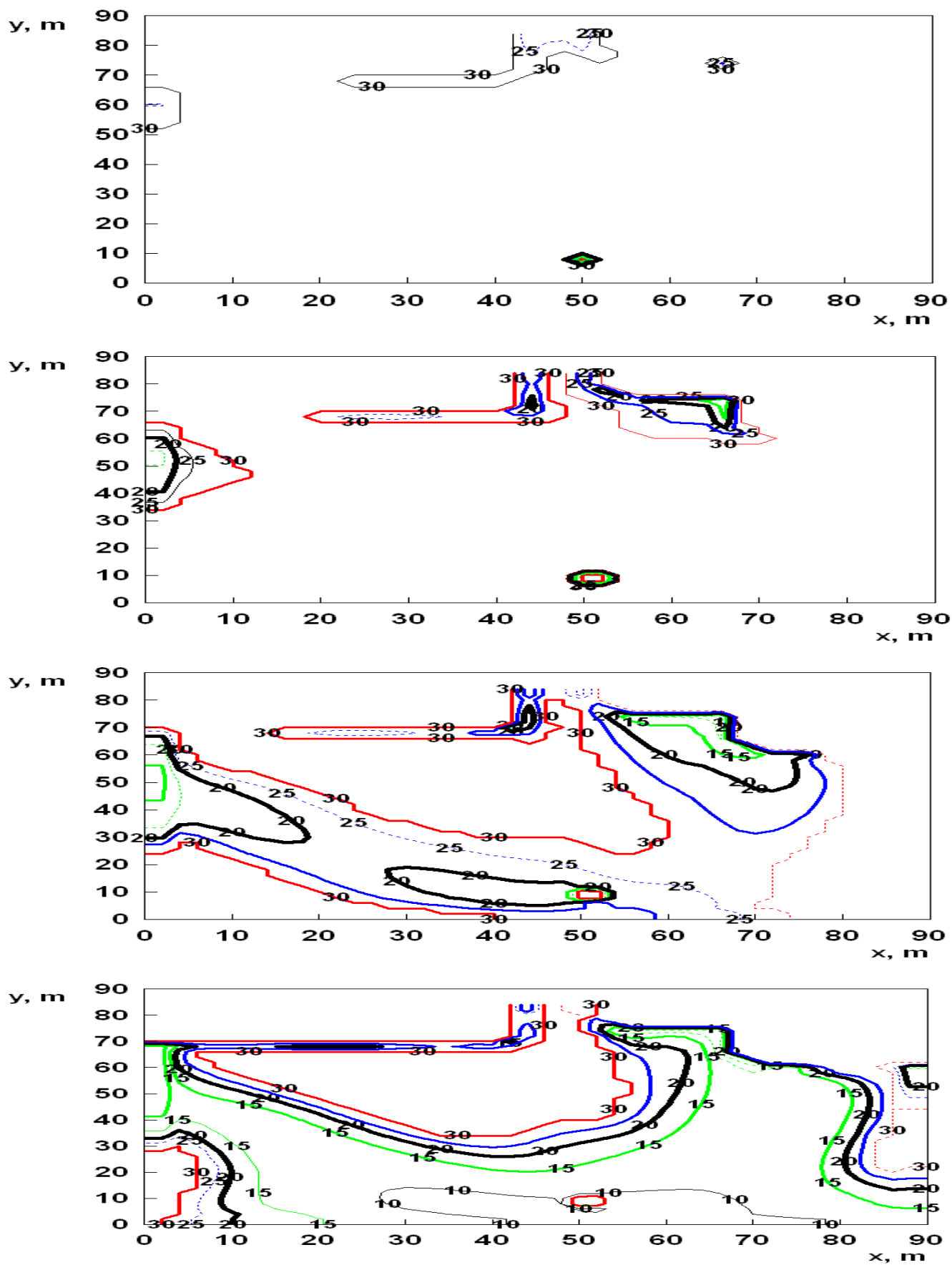


Рисунок 7.8 – Поля дальности видимости в плоскости, находящейся на высоте 2 м от пола, через 480, 600, 720 и 840 с от начала возгорания

7.3. Особенности термогазодинамики пожара в атриуме 5-этажного здания торгово-развлекательного комплекса «Галерея»

5-этажное здание торгово-развлекательного комплекса «Галерея» по включает помещения класса функциональной пожарной опасности Ф2.1, Ф3.1, Ф3.2, Ф4.3, Ф3.2 и Ф5.2.

Здание имеет в плане форму прямоугольного треугольника, 5-ти этажное. В комплексе выполнены многосветные атриумы (северный, южный, восточный, западный) с расположенными вдоль них пассажами. В объеме 1-го этажа здания, в том числе на антресолях, размещаются торговые помещения. 2-ой и 3-ий этажи предназначены для торговых помещений и предприятия общественного питания. На 4-ом этаже – кинотеатры, боулинг, на 5-ом этаже детская игровая зона, группы офисных помещений, помещений физкультурно-оздоровительного назначения: тренажерные и спортивные залы, плавательный бассейн, комплекс SPA.

В качестве наиболее опасного сценария развития пожара принимаем следующую расчетную ситуацию:

- первичный очаг загорания (горючая нагрузка - здание 1-2 степени огнестойкости; мебель + ткани [41]) находится на 1-ом этаже в крупном магазине MSU 3A на отметке 0.00;

- ОФП распространяются по цилиндрическому атриуму вверх до стеклянного перекрытия;

- после заполнения цилиндрического атриума от стеклянного покрытия до 4-го этажа ОФП начинают перетекать в прямоугольные атриумы (восточный и западный) и затем в овальный атриум.

Численные эксперименты выполнены с использованием программы для ЭВМ [70].

На рисунках 7.9 –7.11 представлены поля температур и оптической плотности дыма в поперечном и продольном сечениях цилиндрического атриума в различные моменты времени от начала пожара.

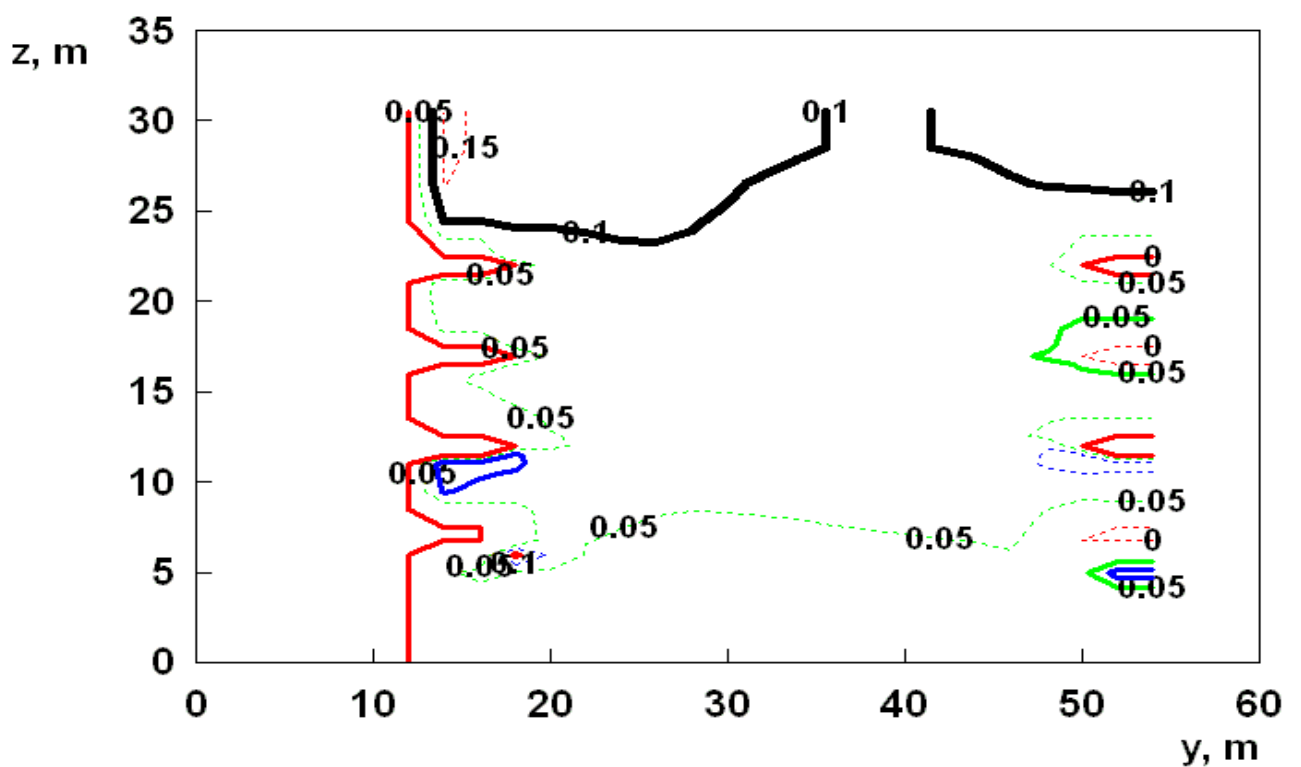
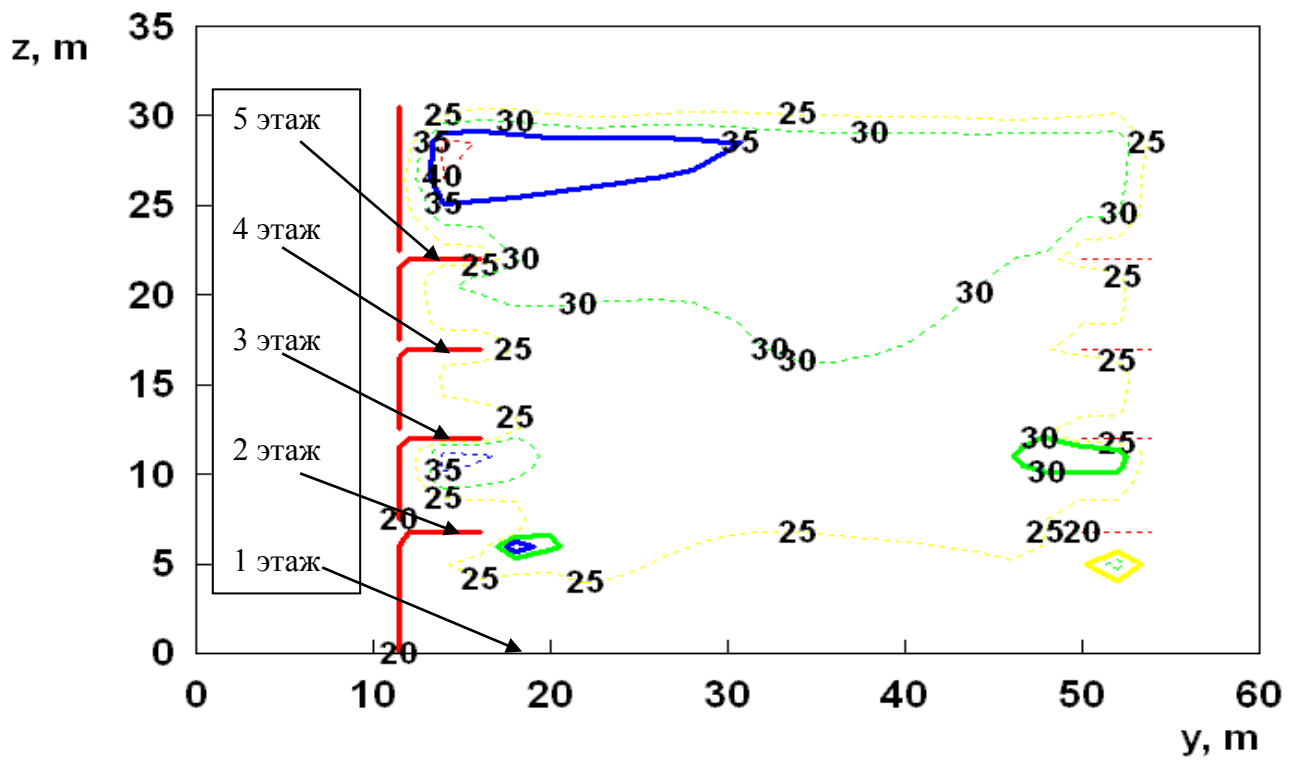


Рисунок 7.9 – Поля температур и оптической плотности дыма в поперечном сечении цилиндрического атриума через 540 с от начала пожара

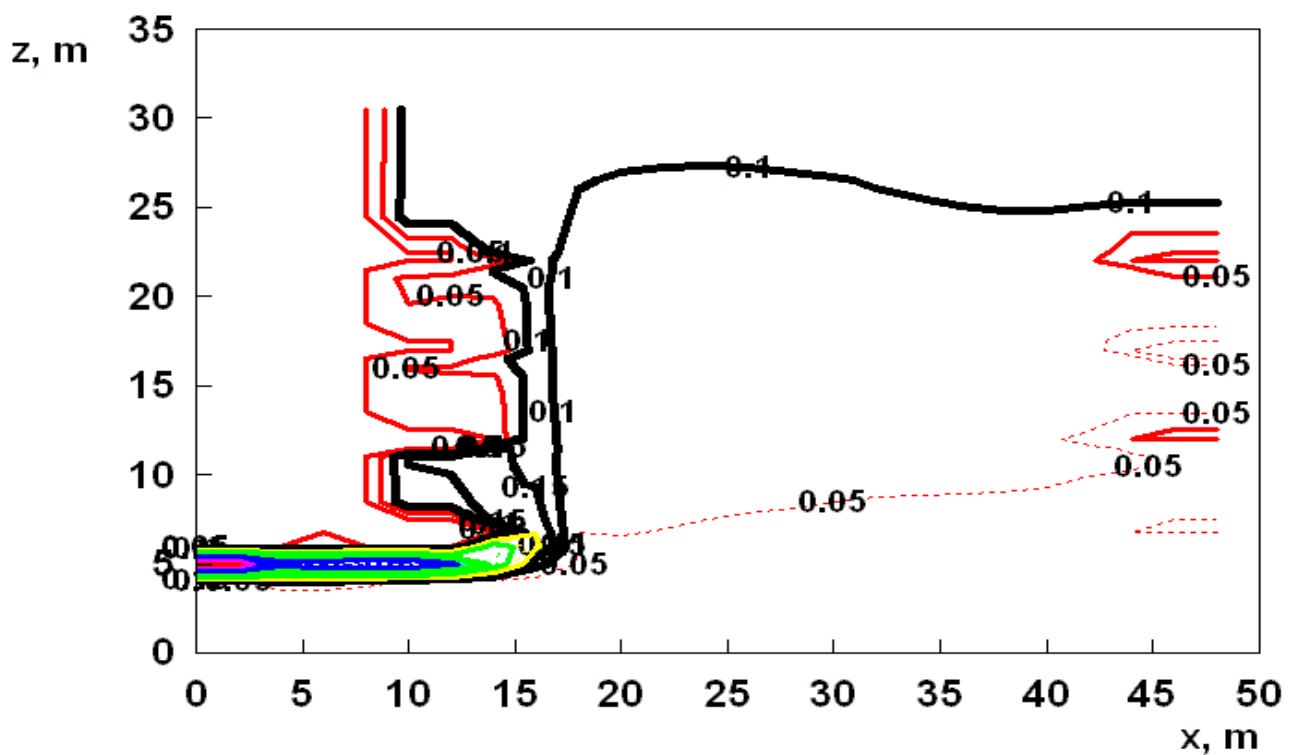
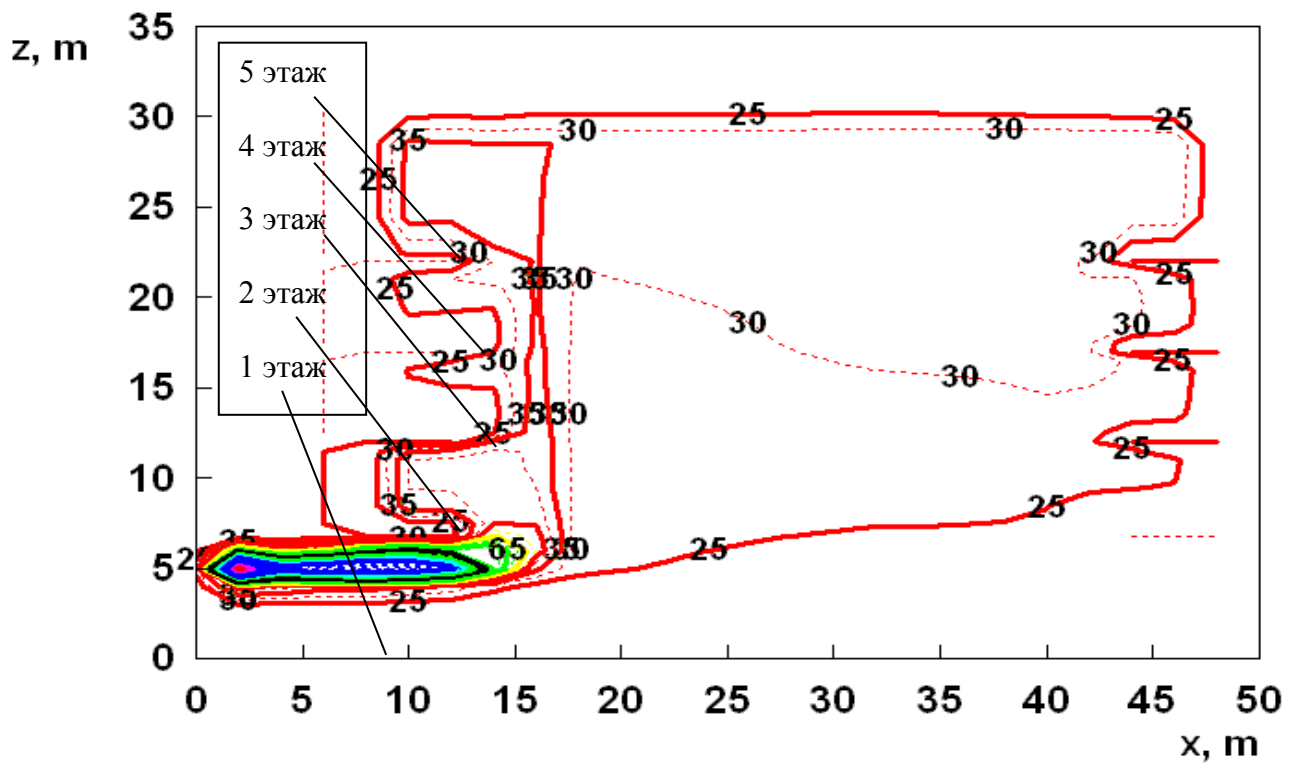


Рисунок 7.10 – Поля температур и оптической плотности дыма в продольном сечении цилиндрического атриума через 540 с от начала пожара

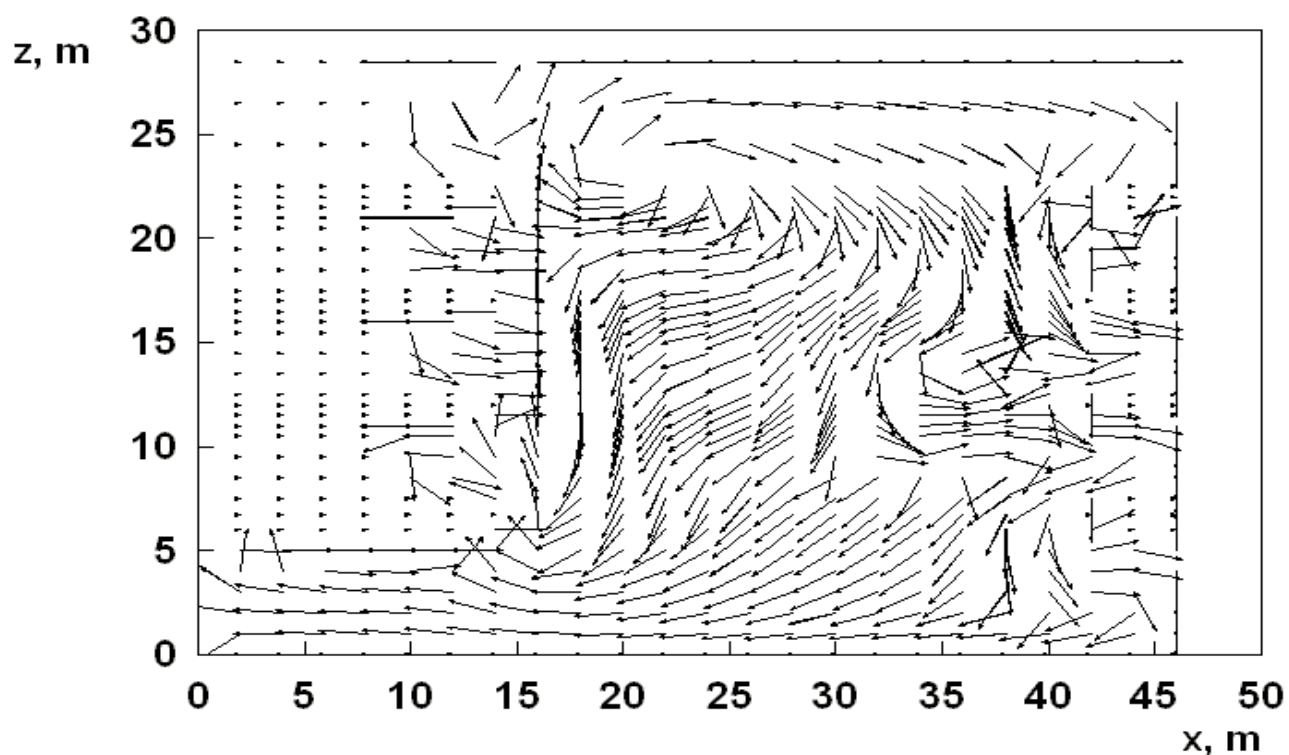
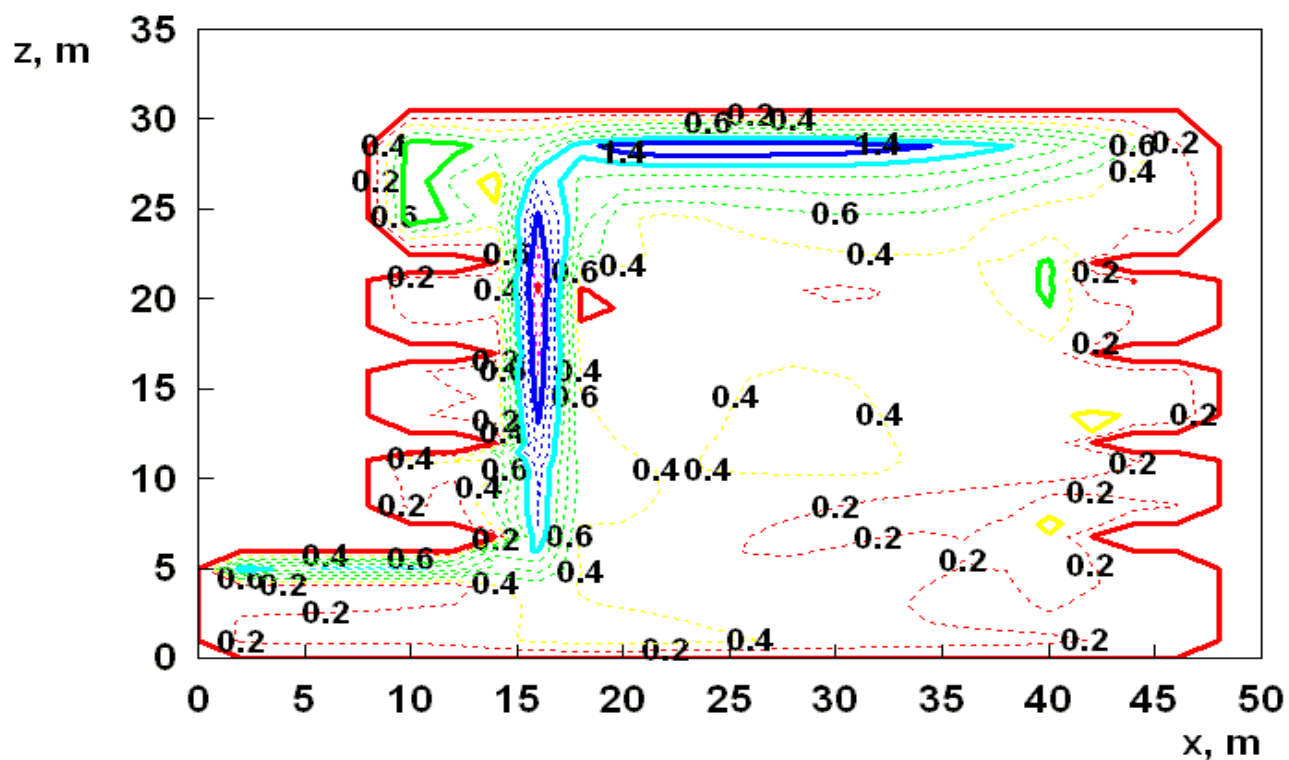


Рисунок 7.11 – Поля скоростей и схемы течения в продольном сечении цилиндрического атриума через 540 с от начала возгорания

На рисунках 7.9 и 7.11 следующие обозначения: x, y, z – координаты вдоль длины, ширины и высоты помещения; температура приведена в °С, оптическая плотность дыма дана Нп/м, дальность видимости приведена в м, скорость - в м/с.

Результаты численных экспериментов показали, что расчетное время блокирования ОФП эвакуационных выходов (критическим ОФП является потеря видимости) этажей цилиндрического атриума составляет:

5-й этаж: $\tau_{бл5}=6,92$ мин.;

4-й этаж: $\tau_{бл4}=7,69$ мин.;

3-й этаж: $\tau_{бл3}=8,24$ мин.;

2-й этаж: $\tau_{бл2}=6,95$ мин.;

1-й этаж: $\tau_{бл1}=9,67$ мин.

Анализ полученных данных по динамике ОФП позволяет сделать вывод о том, что общепринятые представления о распространении ОФП в атриуме при натекании продуктов горения из горящего смежного помещения в атриумное пространство требуют корректировки. В традиционном подходе продукты горения поднимаются вверх до перекрытия, образуют припотолочный слой, который опускается вниз, последовательно блокируя эвакуационные выходы на этажах сверху вниз.

Однако, по результатам расчетов для рассматриваемого атриума:

$$\tau_{бл2} \approx \tau_{бл5}; \tau_{бл2} < \tau_{бл3}; \tau_{бл2} < \tau_{бл4}.$$

Такая последовательность блокировки выходов различных этажей объясняется особенностями термогазодинамической картины пожара в атриуме. Из рисунков 7.10 и 7.11 видно, что в атриуме возникают сложные конвективные течения, которые приводят к воздействию на конвективную колонку, образующуюся из натекающих продуктов горения в атриум, что приводит к направлению части продуктов горения из колонки в пространство 2-го этажа. Таким образом, последовательность блокирования ОФП различных

этажей, выходящих в атриумное пространство, определяется не только высотой этажа, но, в первую очередь, особенностями развития пожара.

7.4. Особенности термогазодинамики пожара в подземной автостоянке торгово-развлекательного комплекса «Вегас II»

Здание торгово-развлекательного комплекса «Вегас II» включает помещения класса функциональной пожарной опасности Ф 2.1, Ф 3.1, Ф 3.2, Ф 3.5, Ф 3.6, Ф 4.3, Ф 5.1 и Ф 5.2.

Здание комплекса является 5-ти этажным с подземной стоянкой автомобилей на -1 и -2 этажах.

Рассмотрим особенности распространения ОФП в подземной автостоянке на -1 этаже с габаритными размерами 250×110×2,7 м.

На рисунке 7.12 на плане этажа для наиболее опасного сценария его развития показано место возникновения начального очага пожара (горючая нагрузка - автомобиль [41]), а также обозначены места расположения эвакуационных выходов (заблокированный выход зачеркнут).

Численные эксперименты выполнены с использованием программы для ЭВМ [70].

На рисунках 7.13–7.15 приведены поля дальности видимости в плоскости, находящейся на высоте 1,7 м от пола, в различные моменты времени.

Поля параметров газовой среды помещения (температура, оптическая плотность дыма, скорость и направления течения) в поперечном сечении приведены на рисунке 7.16.

На рисунках 7.13–7.16 следующие обозначения: x , y , z – координаты вдоль длины, ширины и высоты помещения; температура приведена в °С, оптическая плотность дыма дана Нп/м, дальность видимости приведена в м, скорость - в м/с.

Анализ полученных данных по динамике ОФП позволяет сделать вывод о том, что общепринятые представления о распространении ОФП с образованием

припотолочного слоя для помещений большой площади (в данном примере - 27500 м²) и маленькой высоты (2,7 м) не корректны.

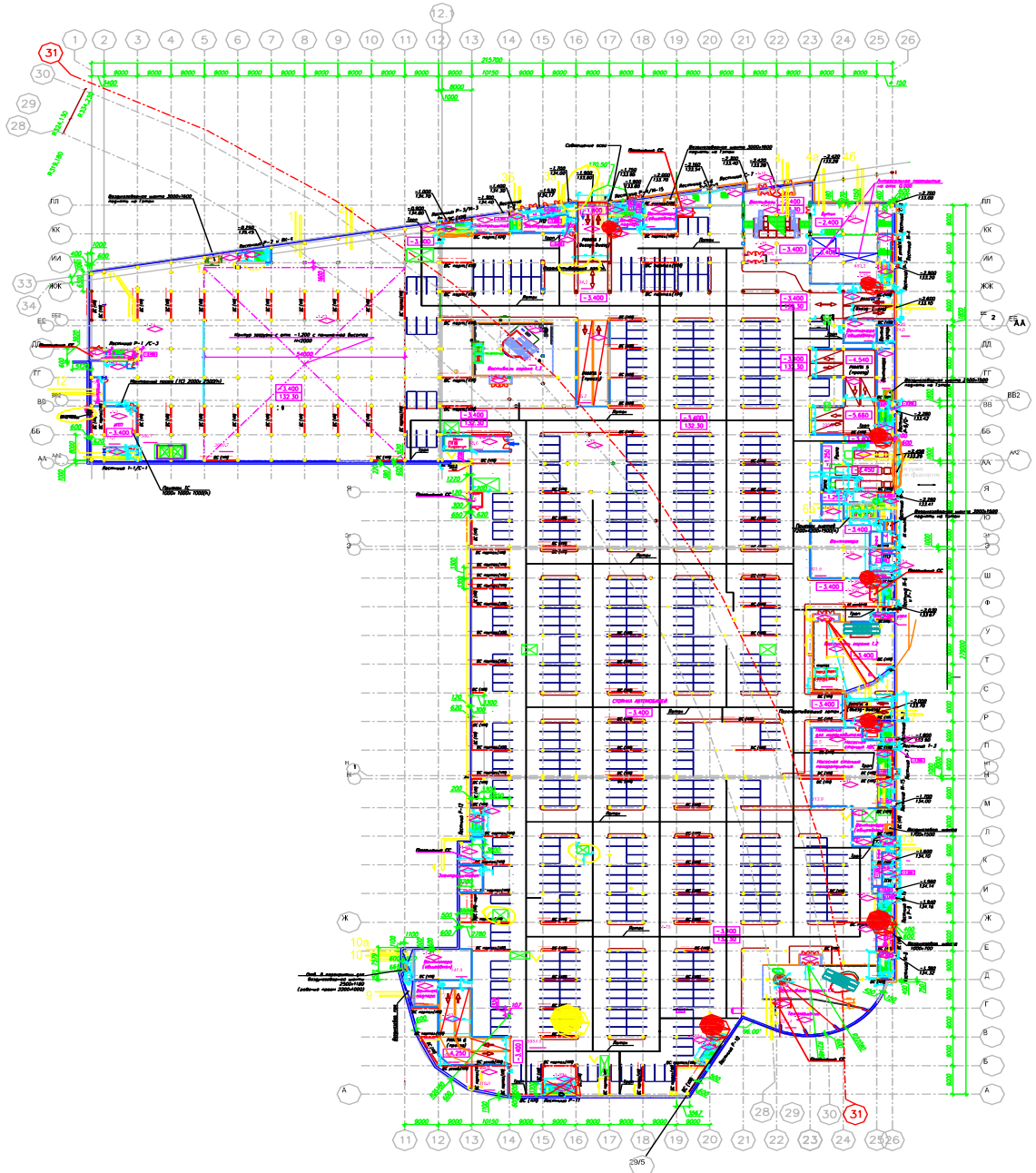


Рисунок 7.12 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено желтым). Красным цветом обозначены места расположения эвакуационных Выходов

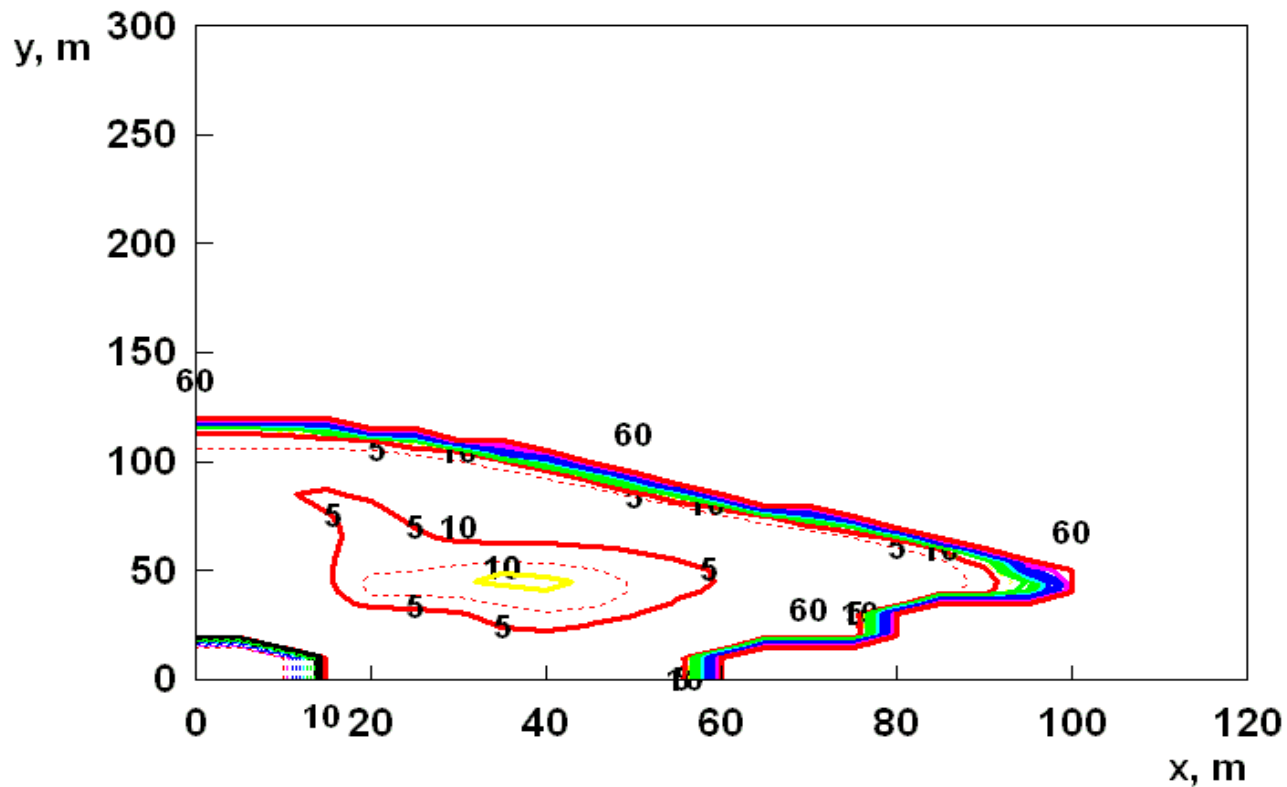
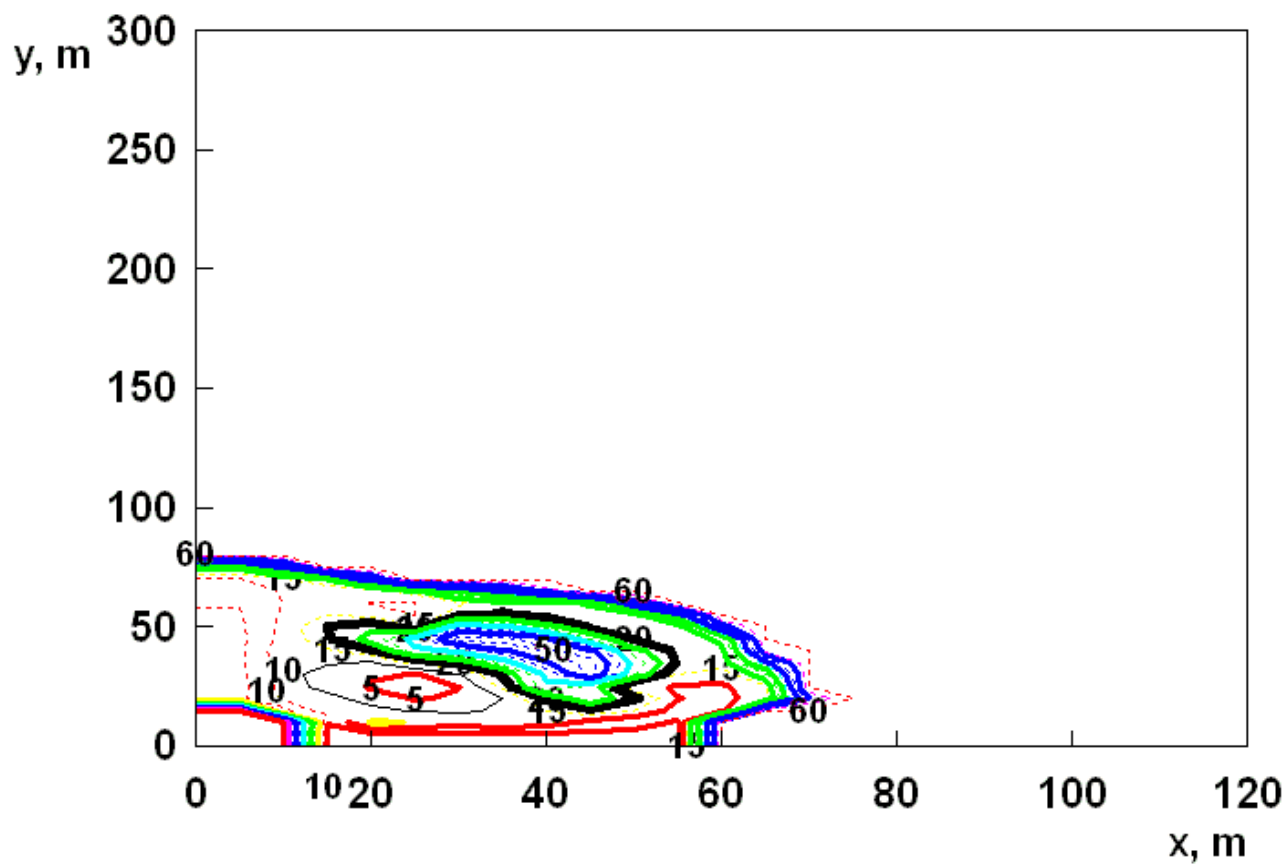


Рисунок 7.13 – Поля дальности видимости в плоскости, находящейся на высоте 1,7 м от пола, на стоянке автомобилей через 300 и 480 с от начала пожара

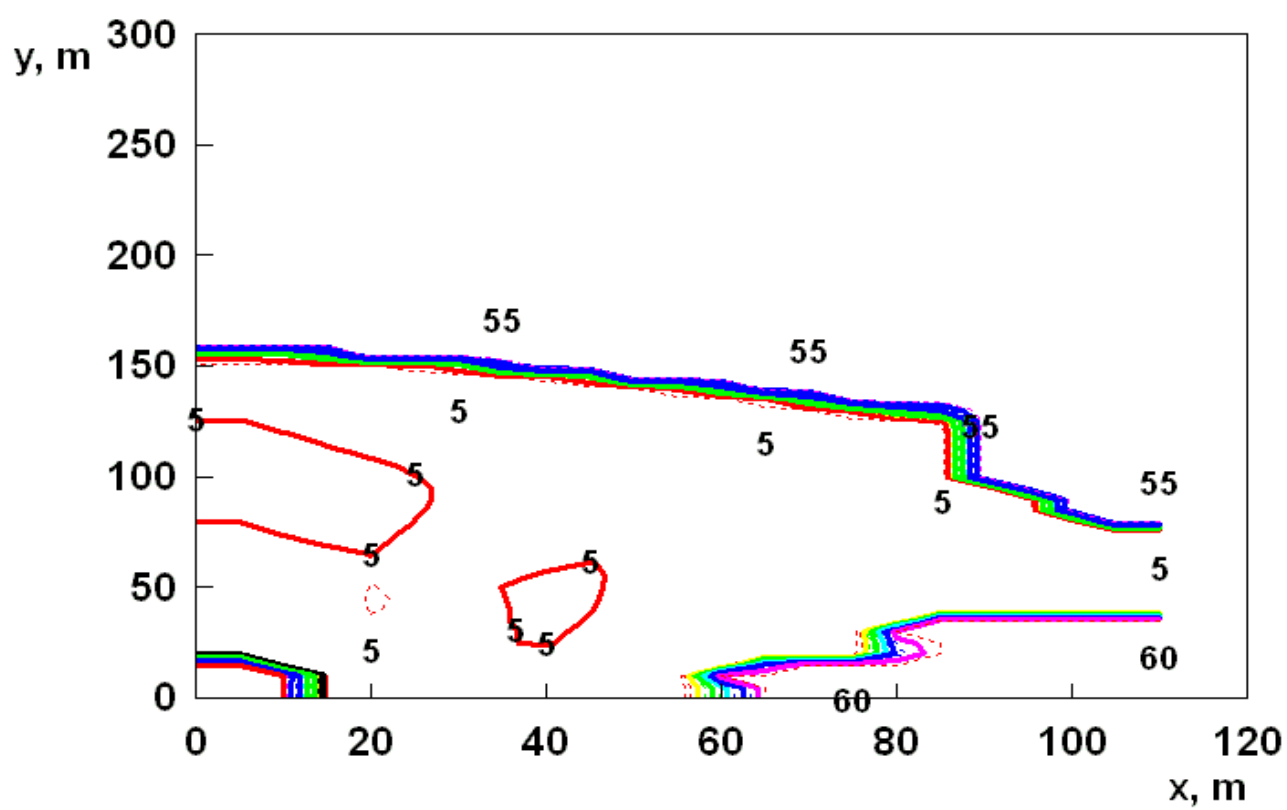
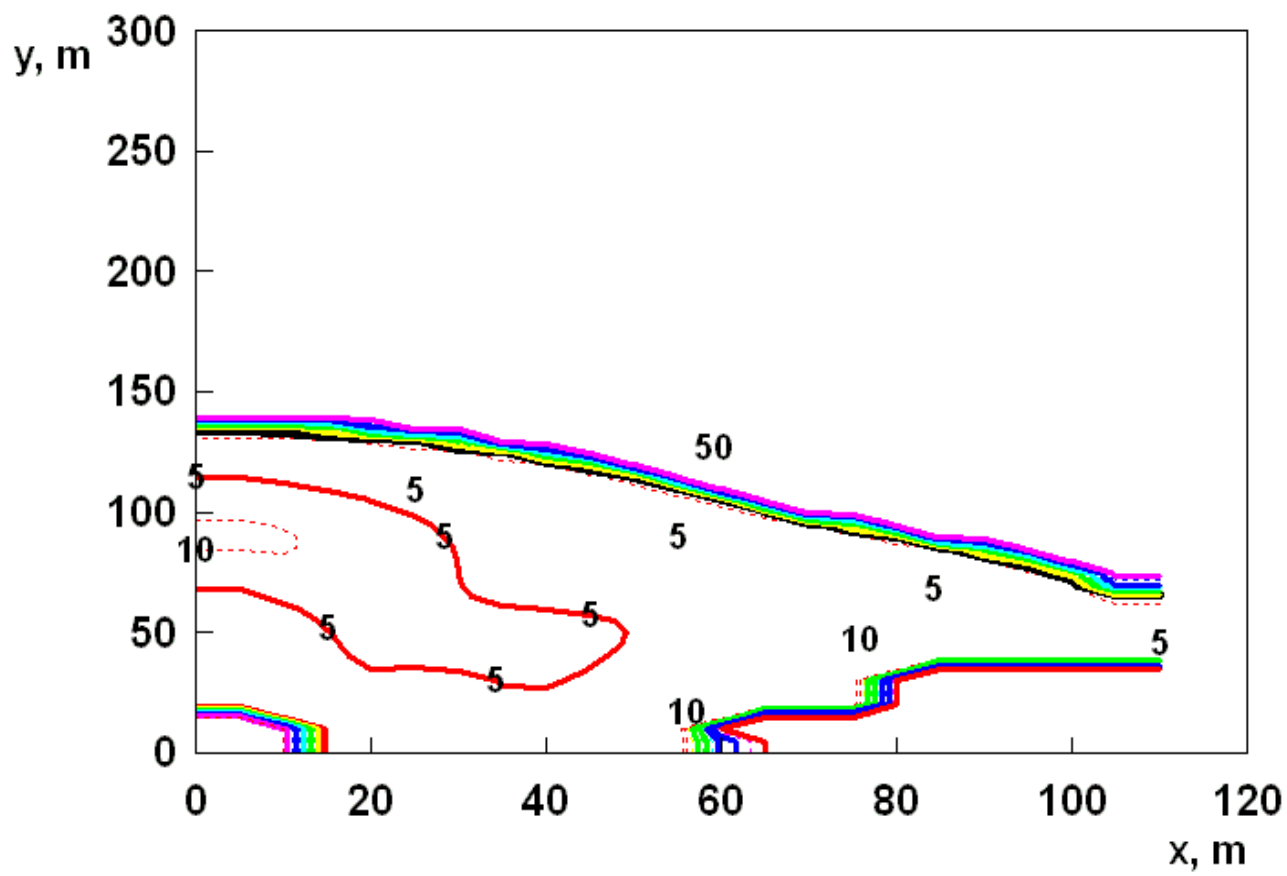


Рисунок 7.14 – Поля дальности видимости в плоскости, находящейся на высоте 1,7 м от пола, на стоянке автомобилей через 600 и 780 с от начала пожара

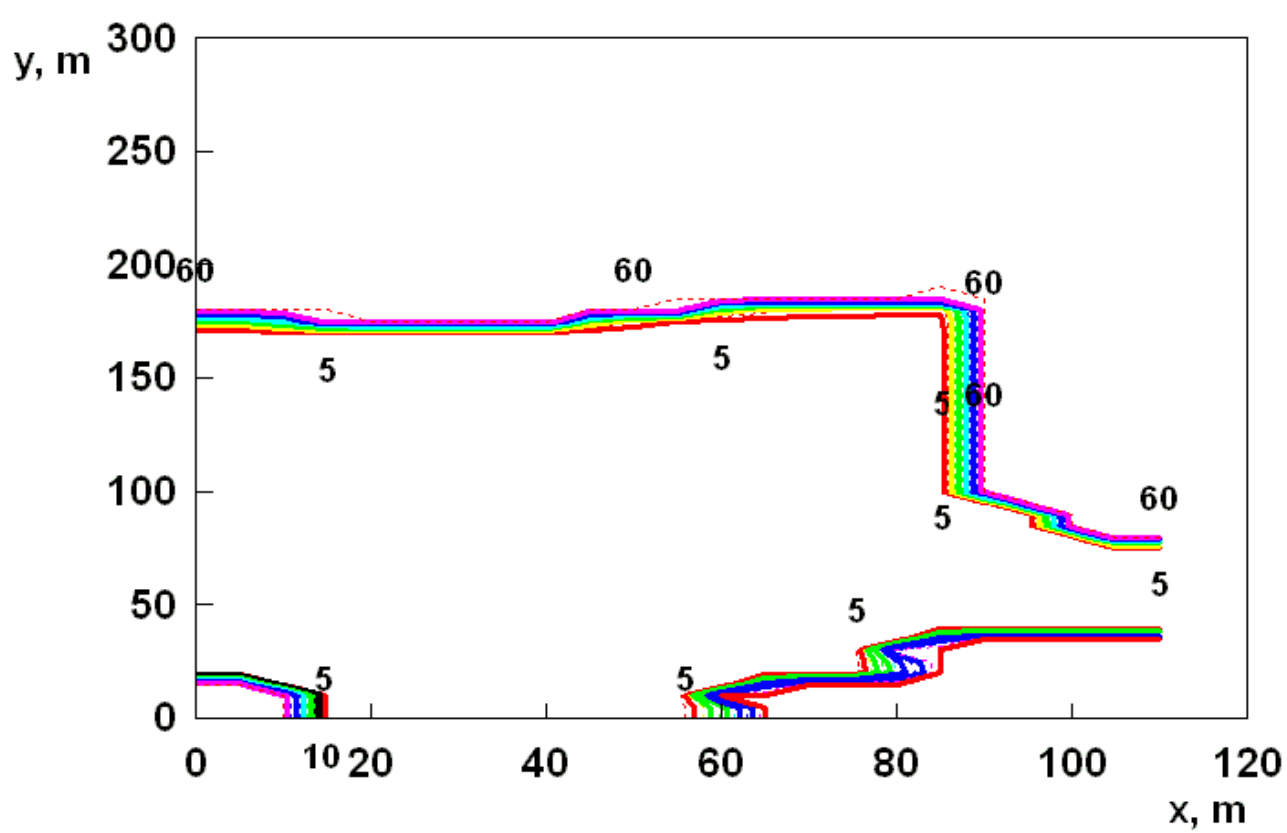
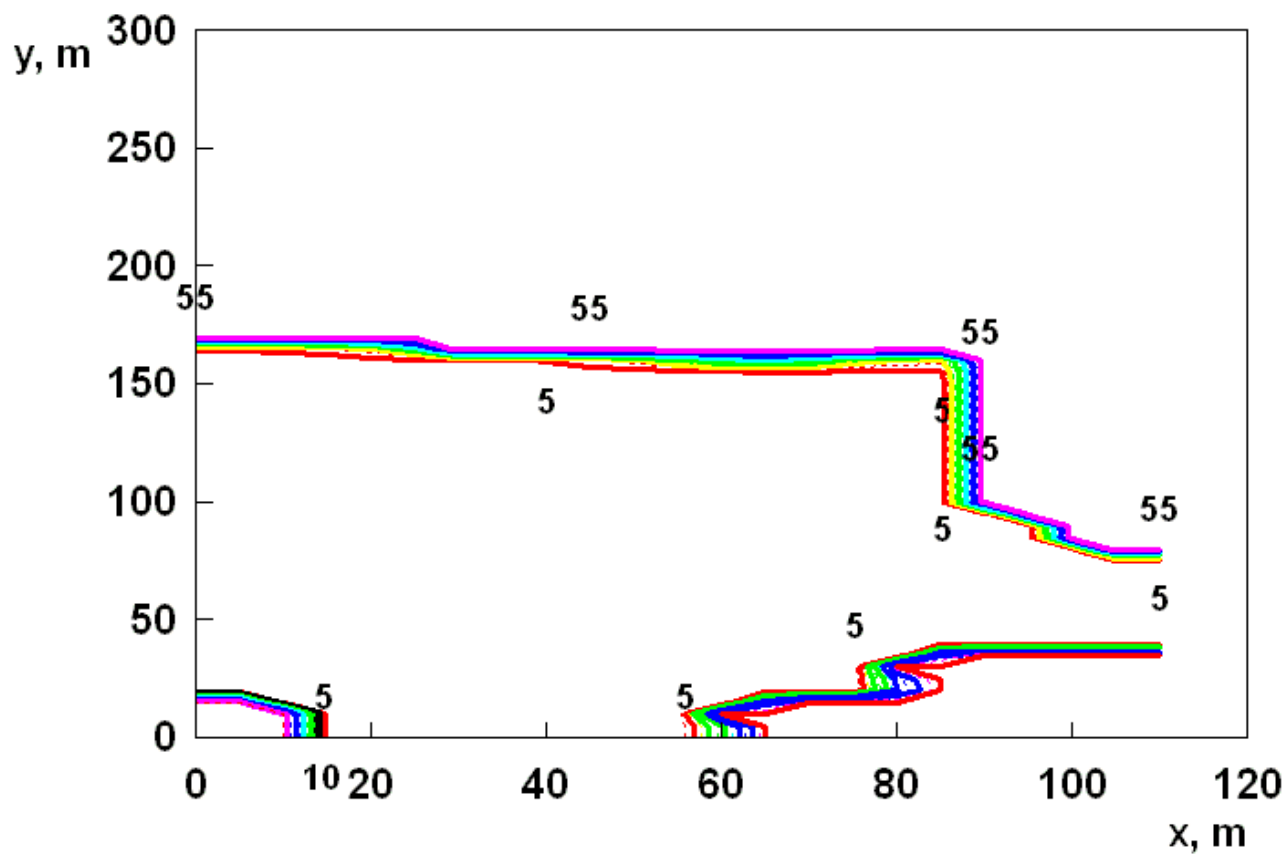


Рисунок 7.15 – Поля дальности видимости в плоскости, находящейся на высоте 1,7 м от пола, на стоянке автомобилей через 960 и 1140 с от начала пожара

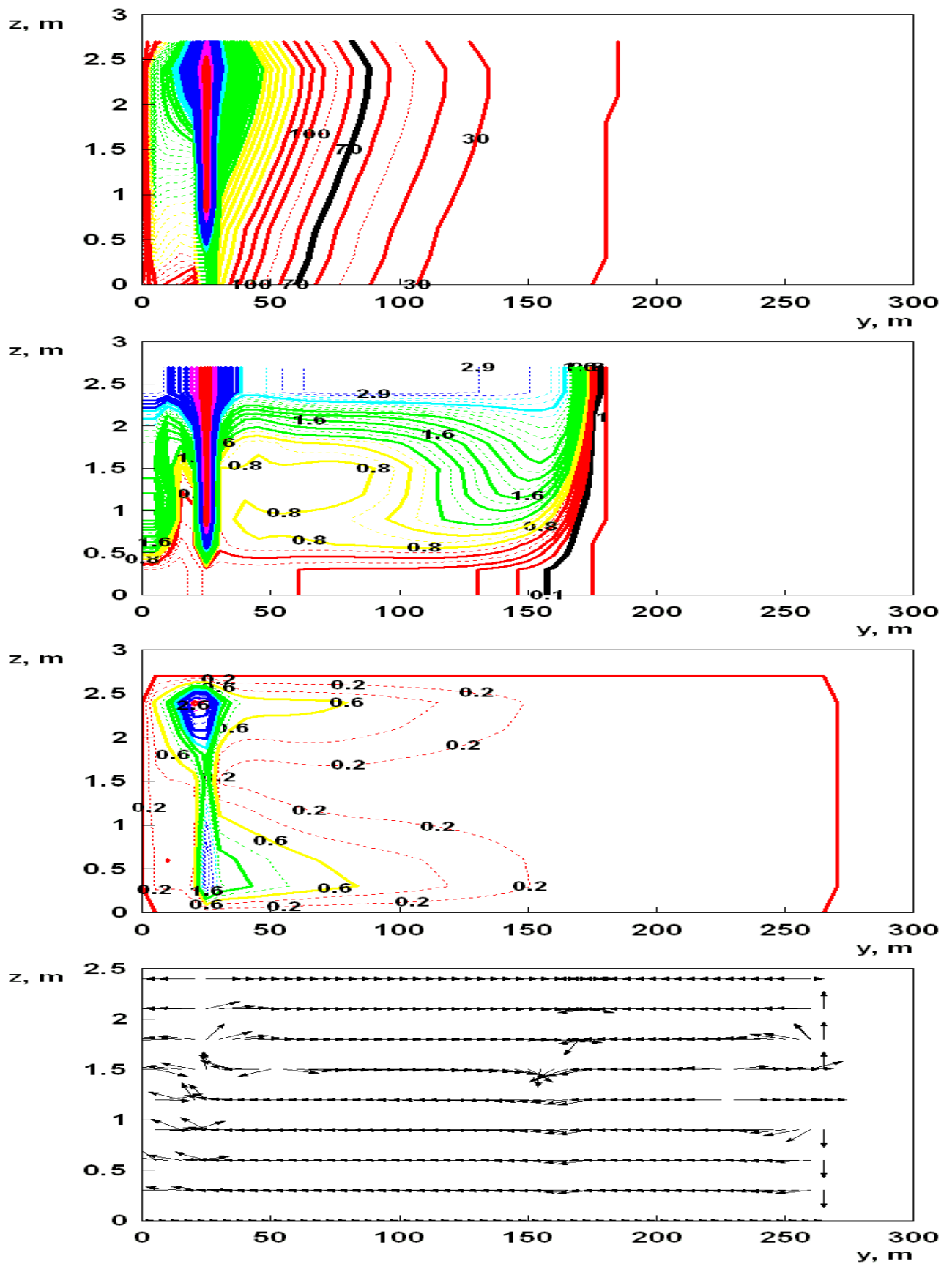


Рисунок 7.16 – Поля параметров газовой среды помещения (температура, оптическая плотность дыма, скорость и направления течения) в поперечном сечении через 1140 с от начала возгорания

Численные эксперименты показали, что зона с повышенными значениями ОФП распространяется постепенно от источника возгорания во всех направлениях, захватывая всю высоту помещения (см. рисунок 7.16).

За время расчетов (1200 с) припотолочный слой по всей поверхности помещения автостоянки не сформировался. Из рисунка 7.16 видно, что неоднородность температурного поля, а значит и остальных ОФП, существенна как по высоте помещения, так и вдоль продольной и поперечной координат.

7.5. Выводы по седьмой главе

1. Наличие в многофункциональных центрах 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.

2. Для помещений большой площади и маленькой высоты (например, встроенных автостоянок, торговых залов и т.д.) припотолочный слой не является плоскопараллельным перекрытию, равномерно прогретым и задымленным.

3. В атриумах многофункциональных центров порядок блокирования путей эвакуации ОФП не определяется однозначно высотой этажа, а зависит от особенностей термогазодинамической картины пожара.

4. Порядок блокирования эвакуационных выходов зависит от объемно-планировочных решений помещений и не определяется только расстоянием от источника возгорания до эвакуационного выхода.

ВЫВОДЫ

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 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 полуоткрытия 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. Полученные 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. 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 этой 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдурагимов, И. М., Процессы горения / И. М. Абдурагимов, А. С. Андросов, Л. К. Исаева, Е. В. Крылов. – М.: ВМПТШ МВД СССР, 1984. – 268 с.
2. Абомелик, Т. П. Методология планирования эксперимента / Т. П. Абомелик. – Ульяновск: УлГТУ, 2011 – 38 с.
3. Адрианов, В.Н. Основы радиационного и сложного теплообмена / В. Н. Андрианов. – М.: Энергия, 1972. – 464 с.
4. Астапенко, В. М. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В. М. Астапенко, Ю. А. Кошмаров, И. С. Молчадский, А. Н. Шевляков. Под ред. Ю. А. Кошмарова. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.
5. Баратов, А. Н. Пожарная безопасность / А. Н. Баратов, В. А. Пчелинцев. – М.: изд-во АСВ, 1997.
6. Башкирцев, М. П. Исследование температурного режима при горении жидкости в помещении: дис. ... канд. техн. наук / М. П. Башкирцев – М., 1967. – 226 с.
7. Волков, Э. П. Моделирование горения твердого топлива / Э. П. Волков, Л. И. Зайчик, В. А. Першуков. – М.: Наука, 1994. – 320 с.
8. Гинзбург В. Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными (тридцать лет спустя, причем уже на пороге XXI века)? // Успехи физических наук. – 1999. – Т. 169, № 4. – С. 420-441.
9. ГОСТ 12.1.004–91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Госстандарт России, 1992. – 78 с.
10. До Т. Т., Пузач С. В. Условия возникновения «поддува» при работе систем дымоудаления с естественным побуждением // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. – №9. – С. 57-63.
11. До Т. Т., Пузач С. В. Влияние высоты стенки дымоудаляющего отверстия на возникновение «поддува» при дымоудалении с естественным побуждением // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. – № 11. – С. 46-52.
12. До Т. Т., Пузач С. В., Пузач В. Г. Термогазодинамические условия возникновения захвата холодного воздуха системой дымоудаления с естественным побуждением при пожаре в помещении // Тепловые процессы в технике. – 2015. – Т. 7. – № 3. – С. 117-125.

13. До Т. Т., Пузач С. В. Снижение эффективности системы дымоудаления с искусственным побуждением при возникновении «поддува» // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24. – № 5. – С. 54-61.
14. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. – М.: Стройиздат, 1988. – 340 с.
15. Драйздейл, Д. Введение в динамику пожаров / Пер. с англ. К. Г. Бомштейна; под ред. Ю. А. Кошмарова, В. Е. Малькарова. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.
16. Есин В. М. Исследование процесса распространения продуктов горения по зданию при пожаре. В кн.: Моделирование пожаров и взрывов / Под общ. ред. Н. Н. Брушлинского и А. Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2000. – С. 127-138.
17. Есин В. М. Введение к каталогу № 3 ООО «ВЕЗА». Вып. № 1.– М.: ООО «ВЕЗА», 2003.
18. Есин, В. М. Пожарная профилактика в строительстве / В. М. Есин, В. И. Сидорук, В. Н. Токарев. – М.: ВИПТШ МВД РФ, 1995.
19. Зотов Ю. С. Расчет времени потери видимости при задымлении помещений / Сб. науч. тр.: Безопасность людей при пожарах. – М.: ВНИИППО, 1986. – С. 45-50.
20. Иглин, С. П. Теория вероятностей и математическая статистика на базе MATLAB: учебное пособие / С. П. Иглин. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. – 612 с.
21. Иевлев, В. М. Турбулентное движение высокотемпературных сплошных сред / В. М. Иевлев. – М.: Наука, 1975. – 256 с.
22. Изменения, вносимые в методику определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности, утвержденную приказом МЧС России от 30.06.2009 № 382. Приложение к приказу МЧС России от 12.12.2011 №749.
23. Изменения, вносимые в методику определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах, утвержденную приказом МЧС России от 10.07.2009 № 404. Приложение к приказу МЧС России №649.
24. Казённов, В. М. Методы расчета тепломассобмена при пожаре для обоснования объемно-планировочных решений зданий и сооружений: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / В. М. Казённов. – М., 2003. – 163 с.

25. Карькин И. Н., Контарь Н. А., Грачев В. Ю. СИТИС 2-09 (Редакция 5) Методические рекомендации по использованию программы CFAST. ООО «СИТИС», 2009. – 64 с.
26. Колодяжный С. А., Кавыгин А. А. Оптимизация работы приточно-вытяжной установки с высокоэффективным пластинчатым рекуператором в циклическом режиме // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2015, № 40 (59). – С. 18-28.
27. Колодяжный С. А., Кавыгин А. А. Расчет современных пластинчатых рекуператоров с использованием функции коэффициента полезного действия // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014, № 36 (55). – С. 182-188.
28. Колодяжный С. А., Кавыгин А. А., Камбург В. Г. Экспериментальные исследования пластинчатого перекрестно-противоточного теплоутилизатора в условиях обмерзания // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014, № 1 (33). – С.20-27.
29. Колодяжный С. А., Козлов В. А., Переславцева И. И. Математическая модель для определения критического времени эвакуации при пожаре // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014, № 3 (35). – С.128-138.
30. Колодяжный С.А., Колосова Н.В. Методика расчета противодымной приточной вентиляции // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2015, № 3 (60). – С. 46-51.
31. Колодяжный С. А., Однолько А. А., Ситников И. В. Моделирование динамики опасных факторов пожара с учетом действий добровольных пожарных формирований / В сб. «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы». – Сб. статей по материалам III всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Воронеж, 2012. – С. 219-221.
32. Колодяжный С. А., Переславцева И. И. Математическое моделирование динамики основных опасных факторов в начальной стадии пожара // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного

- университета. – 2014, №4. – С.403-412.
33. Колодяжный С. А., Переславцева И. И. Определение критического времени эвакуации при пожаре по потере видимости // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014, №4(36). – С.168-176.
 34. Колодяжный С. А., Сотникова К. Н., Кавыгин А. А. Автоматизированный расчет процесса охлаждения воздуха в жидкостном теплообменнике // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013, Т. 9, № 2. – С.98-102.
 35. Колодяжный С. А., Старцева Н. А., Трусов С. И. Математическая модель переноса пожаровзрывоопасных веществ в сложных вентиляционных условиях // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2012, № 5. – С.130-133.
 36. Колодяжный С. А., Сушко Е. А., Сазонова С. А., Склярков К. А. Обеспечение безопасности функционирования систем газоснабжения при мониторинге технического состояния в условиях информационной неопределенности // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014, № 2 (34). – С.132-140.
 37. Колодяжный С. А., Сушко Е. А., Сазонова С. А., Седаев А. А. Решение задачи статического оценивания систем газоснабжения // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2013, № 4 (32). – С.25-33.
 38. Колодяжный С. А., Трусов С. И., Аксенов С. П. Оценка эффективности системы дымоудаления при горении движущегося состава в тоннеле // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2012, № 1. – С.205-210.
 39. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
 40. Кошмаров, М. Ю. Моделирование динамики начальной стадии пожара в помещениях, зданиях и сооружениях при воспламенении горючей жидкости: Дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / М. Ю. Кошмаров. – М.,

2004. – 195 с.
41. Кошмаров, Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учебное пособие / Ю. А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
 42. Кошмаров Ю. А. Развитие пожара в помещении / Горение и проблемы тушения пожаров: сб. науч. тр. Вып. 5. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1977. – С. 31-45.
 43. Кошмаров, Ю. А. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле / Ю. А. Кошмаров, М. П. Башкирцев. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1987. – 414 с.
 44. Кошмаров, Ю. А. Лабораторный практикум по курсу «Прогнозирование опасных факторов пожара» / Ю. А. Кошмаров, Ю. С. Зотов. – М.: ВИПТШ МВД РФ, 1996. – 51 с.
 45. Кошмаров, Ю. А. Процессы нарастания опасных факторов пожара в производственных помещениях и расчет критической продолжительности пожара / Ю. А. Кошмаров, В. В. Рубцов. – М.: МИПБ МВД РФ, 1999. – 90 с.
 46. Кошмаров Ю. А., Юн С. П. Исследование начальной стадии развития пожара в салоне вагона метрополитена на моделях. Сборник науч. техн. информ. № 5. Деп. В ГНИЦУИ МВД СССР, № 15 4д. 1985. – 43 с.
 47. Крылова, А. В. Планирование и организация эксперимента: учеб. пособие / А. В. Крылова, Е. И. Шмитько, Т. Ф. Ткаченко; Воронежский ГАСУ. – Воронеж, 2011. – 116 с.
 48. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
 49. Леонтьев А. И. Пути развития теории тепломассообмена // Известия РАН. Энергетика. – 1996, № 2. – С. 22-27.
 50. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
 51. Мелькумов В. Н., Колодяжный С. А. Основные результаты научной деятельности кафедры теплогазоснабжения и кафедры пожарной и промышленной безопасности ВГАСУ // Промышленное и гражданское строительство. – 2010, № 9. – С. 11-12.
 52. Мелькумов В. Н., Колодяжный С. А., Иншаков Ю. З. Экологическое воздействие пожаров на окружающую среду // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного универси-

- тета. Строительство и архитектура. – 2008, № 4. – С.198-208.
53. Мелькумов В. Н., Кузнецов С. Н. Динамика формирования воздушных потоков и полей температур в помещении // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. – 2008. – № 4. – С. 172-178.
 54. 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.
 55. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. Приложение к приказу МЧС России от 10.07.2009 № 404.
 56. Методические рекомендации «Расчетное сопротивление основных параметров противодымной вентиляции зданий». Утверждены ФГУ ВНИИПО МЧС России 24 декабря 2007 г.
 57. Методические указания к выполнению курсовых работ по прогнозированию опасных факторов пожара в помещении / Абросимов Ю. Г., Андреев В. В., Зотов Ю. С., Кошмаров Ю. А., Пузач С. В., Рамазанов Р. Н. – М.: МИПБ МВД РФ, 1997. – 65 с.
 58. Методы расчета температурного режима пожара в помещениях зданий различного назначения: Рекомендации. – М.: ВНИИПО, 1988. – 56 с.
 59. Молчадский, И. С. Пожар в помещении / И. С. Молчадский. – М.: ВНИИПО, 2005. – 456 с.
 60. Монахов, В. Т. Методы исследования пожарной опасности веществ / В. Т. Монахов. – М.: Химия, 1972. – 424 с.
 61. Монтгомери, Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д. К. Монтгомери; пер с англ. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.
 62. Нгуен Тхань Хай. Методика расчета необходимого времени эвакуации людей при пожаре в машинных залах ГЭС Вьетнама в условиях работы системы дымоудаления: Дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. – М.: АГПС МЧС России, 2010. –170 с.
 63. Оцисик, М. Н. Сложный теплообмен / М. Н. Оцисик. – М.: Мир, 1976. – 616 с.
 64. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
 65. Переславцева И. И., Колодяжный С. А. Современное состояние и

- проблемы пожарной безопасности объектов строительства // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014, № 5 (56). – С. 115-122.
66. Пинчук, С. И. Организация эксперимента при моделировании и оптимизации технических систем: учебное пособие / С. И. Пинчук. – Днепропетровск: ООО Независимая издательская организация "Дива", 2008. – 248 с.
 67. Противодымная защита зданий и помещений: Пособие 4.91 к СНиП 2.04.05-91. – М: Промстройпроект, 1992. – 75 с.
 68. Противодымная защита при пожаре: Рекомендации к МДС 41-1.99 СНиП 2.04.05-91*. – М.: СантехНИИпроект, 2000. – 66 с.
 69. Пузач С. В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С. В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
 70. Пузач С. В. Интегральные, зонные и полевые методы расчета динамики опасных факторов пожара. Свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614238 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 8.12.2006 г.
 71. Пузач С. В. Определение огнестойкости строительных конструкций с учетом параметров реального пожара. Свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614237 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 8.12.2006 г.
 72. Пузач С. В. Особенности тепломассообмена при горении жидкой горючей нагрузки в помещении с открытым проемом // Инженерно-физический журнал. – 1999. – Т. 72, № 5. – С. 1025-1032.
 73. Пузач С. В., Абакумов Е. С. К определению высоты пламенной зоны при диффузионном горении жидкости // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, №2. – С. 31-34.
 74. Пузач С. В., Абакумов Е. С. Модифицированная зонная модель расчета термогазодинамики пожара в атриуме // Инженерно-физический журнал. – 2007. – Т. 80, № 2. – С. 84-89.
 75. Пузач С. В., Абакумов Е. С. Некоторые особенности термогазодинамической картины пожара в высоких помещениях // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19, № 2. – С. 28-33.
 76. Пузач С. В., Базилевич А. Я., Пузач Е. С., Карпенко Д. Г., Сулейкин Е. В.

- Особенности разработки противопожарных мероприятий при строительстве зданий многофункционального назначения со сложной геометрией // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. - Т. 13, №1. – С. 20-29.
77. Пузач С. В., До Т. Т. Влияние высоты стенки дымоудаляющего отверстия на возникновение «поддува» при дымоудалении с естественным побуждением // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 11. – С. 46-52.
78. Пузач С. В., До Тхань Тунг, Нгуен Тхань Хай. Снижение эффективности системы дымоудаления с искусственным побуждением при возникновении «поддува» // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24, № 5. – С. 54-61.
79. Пузач С. В., Колодяжный С. А. Особенности пожарной опасности многофункциональных центров с атриумами (часть 1) // Технологии техносферной безопасности. – Вып. 6 (64). – 2015. – 10 с. – <http://ipb.mos.ru/ttb>
80. Пузач С. В., Колодяжный С. А. Особенности пожарной опасности многофункциональных центров с атриумами (часть 2) // Технологии техносферной безопасности. – Вып. 1 (65). – 2016. – 10 с. – <http://ipb.mos.ru/ttb>
81. Пузач С. В., Колодяжный С. А., Колосова Н. В. К определению формы конвективной колонки над очагом пожара в помещении // Технологии техносферной безопасности. – Вып. 6 (64). – 2015. – 8 с. – <http://ipb.mos.ru/ttb>
82. Пузач С. В., Колодяжный С. А., Колосова Н. В. Модифицированная зонная модель расчета термогазодинамики пожара в помещении, учитывающая форму конвективной колонки // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. Т. 24, № 12. – С. 33-39.
83. РИА Новости
<http://ria.ru/incidents/20120907/744880917.html#ixzz3sJ31VrrJ>.
84. РИА Новости
<http://ria.ru/world/20120528/659499826.html#ixzz3sJ7d2Hwu>.
85. РИА Новости
<http://ria.ru/incidents/20130227/924808772.html#ixzz3sJ1ACWOU>.
86. РИА Новости
<http://ria.ru/world/20110825/423558740.html#ixzz3sJAKRBjz>.

87. РИА Новости
<http://ria.ru/inquest/20120116/540646841.html#ixzz3sJCQFxQ4>.
88. РИА Новости
<http://ria.ru/spravka/20131017/970768033.html#ixzz3sJDcgiRw>.
89. РИА Новости
<http://ria.ru/spravka/20131017/970768033.html#ixzz3sJEIKUXI>.
90. РИА Новости
<http://ria.ru/spravka/20131017/970768033.html#ixzz3sJEtkMgK>.
91. РИА Новости
<http://ria.ru/spravka/20131017/970768033.html#ixzz3sJHPIMJJ>.
92. РИА Новости
<http://ria.ru/spravka/20131017/970768033.html#ixzz3sJI9Viv2>.
93. РИА Новости
<http://ria.ru/spravka/20131017/970768033.html#ixzz3sJIr6FyV>.
94. РИА Новости
<http://ria.ru/spravka/20131017/970768033.html#ixzz3sJIrKDDd>.
95. РИА Новости
<http://ria.ru/incidents/20150321/1053783615.html#ixzz3sJOdtolw>.
96. РИА Новости
<http://ria.ru/spravka/20150311/1052024360.html#ixzz3sJW1QiD4>.
97. Рубцов, В. В. Динамика опасных факторов пожара и расчет критической продолжительности пожара в производственных помещениях: Дис. ... канд. техн. наук / В. В. Рубцов. – МИПБ МВД РФ. – М.: 1999. – 206 с.
98. Саксон, Р. Атриумные здания / Р. Саксон. – М.: Стройиздат, 1987. –135 с.
99. Серков Б. Б., Фирсова Т. Ф. К вопросу о современном подходе к обеспечению противопожарной защиты зданий // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2009, №2. – С. 25-32.
100. Ситников И. В., Колодяжный С. А. Анализ проблем моделирования динамики пожара // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2015, № 1 (14). – С. 29-35.
101. Ситников И. В., Колодяжный С. А., Однолько А. А. Экспериментальное исследование и моделирование динамики удельной массовой скорости выгорания жидкости в условиях функционирования противодымной вентиляции // Научный вестник Воронежского государственного

- архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014, № 3 (35). – С.149-157.
102. Ситников И. В., Шепелев И. А., Колодяжный С. А., Однолько А. А. Анализ математических моделей пожара, применяемых для расчета времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. – 2012, № 1. – С. 81-87.
103. Скляр К. А., Колодяжный С. А., Потапова С. О. Распределение вентиляционных воздушных потоков в помещении от источника теплоты // Вестник МГСУ. – 2011, № 7. – С. 554-558.
104. Скляр К. А., Колодяжный С. А., Драпалюк Д. А. Метод расчета рациональных режимов работы местной и общеобменной вентиляции // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2012, № 5. – С.116-118.
105. Скрыпник А. И., Старцева Н. А., Колодяжный С. А. Разработка математической модели управления параметрами воздушной среды в помещении при аварийном выбросе взрывоопасных веществ // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2003, № 3. – С. 76-79.
106. Снегирев А. Ю., Танклевский Л. Т. Численное моделирование турбулентной конвекции в помещении при наличии очага загорания // Теплофизика высоких температур. – 1998. – Т. 36, № 6. – С. 973-983.
107. Спириц, Н. А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента // Н. А. Спириц, В. В. Лавров; под. общ. ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 257 с.
108. Старцева Н. А., Колодяжный С. А. Пожарная безопасность при проектировании насосных и компрессорных станций // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2008, № 2. – С.155-161.
109. Старцева Н. А., Колодяжный С. А. Динамика воздухообмена в электропомещениях химических производств // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2008, № 3. – С.86-95.
110. Стецовский, М. П. Исследования газообмена на этаже пожара и

- определение некоторых параметров для расчета вентиляционных систем противодымной защиты жилых зданий: Дис. ... канд. техн. Наук / М. П. Стецовский. – М.: МИСИ, 1979.
111. Сэбиси, Т. Конвективный теплообмен / Т. Сэбиси, П. Брэдшоу. – М.: Мир, 1987. – 592 с.
 112. Табунщиков Ю. А. и др. Рекомендации АВОК. Расчет параметров систем противодымной защиты жилых и общественных зданий. – М.: АВОК, 2010.
 113. Трусов С. И., Колодяжный С. А., Манохин В. Я. Пожарная безопасность метрополитена // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2011, № 4. – С.203-207.
 114. Федеральный закон «О техническом регулировании» – М.: собрание законодательства Российской Федерации, 2002, № 52.
 115. Федеральный закон №123. «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2008. – 156 с.
 116. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 540 с.
 117. Юн, С. П. Моделирование развития пожара в салонах вагонов метрополитена с целью разработки экспериментального метода оценки пожарной опасности их конструкций: Дисс. ... канд. техн. наук / С. П. Юн. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1985. – 156с.
 118. CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers) Guide E: Fire Engineering, CIBSE, London, 1997. – 202 p.
 119. Chamchine A.V., Graham T.L., Makhviladze G.M. Experimental studies of under ventilated combustion in small and medium scale enclosures / Proceedings of the Forth International Seminar on Fire and Explosion Hazards, 2003. – Pp. 97-107.
 120. Chow W.K., Yin R. CFD simulation of air movement in a big hall induced by a bar cabin fire and studies on free boundary conditions // Journal of Fire Sciences, 1998.
 121. Chow W. K., Li J. Review on Design Guides for Smoke Management System in an Atrium // Int. J. on Engineering Performance – Based Fire Codes. – 2005. – Vol. 7, No. 2. – P. 65-87.
 122. Chow W. K. Determination of the Smoke Layer Interface Height for Hot

- Smoke Tests in Big Halls // *Journal of Fire Sciences*. – 2009. – Vol. 27. – P. 125-141.
123. Chow W. K., Li J. Numerical simulations on thermal plumes with k- ϵ types of turbulence models // *Building and Environment*. – Vol. 2007. – Vol.42, No. 8. – Pp. 2819-2828.
 124. Cooper L. Y. *Smoke and Heat Venting*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (3rd ed.) Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association, Boston, MA, USA (Chapters 3-9), 2002. – 222 p.
 125. Cox G., Kumar S. Field modeling of fire in forced ventilated enclosures // *Combustible Science Technology*. – 1987. – No. 52. – Pp. 7-23.
 126. Daniel T., Joseph T., Frederick W. Fire dynamic of spill fires // *Spill Fires*. – 2000. – P. 1-36.
 127. Delichatsios M.A., Gordon W.S., Lee Y.P. Mass pyrolysis rates and excess pyrolysate in fully developed enclosure fires // *Fire Safety Journal*. – 2004. – Vol. 39. – Pp. 1-21.
 128. Dong H.Q., Garo J.P., Magnognou B., Wang H.Y. A tractable solution for engineering calculations on buoyancy dominated turbulent non-premixed flames // *Fire Science and Technology*. – 2015. – Vol. 34, No. 1. – Pp. 1-21.
 129. Fan W., Wang X. A new numerical calculation method for zone modelling to predict smoke movement in building fires // *Fire Safety Science, Proceedings of the Fifth International Symposium, International Association of Fire Safety Science, Melbourne, Australia*. – 1997. – Pp. 487-498.
 130. Fusegi T., Farour B. Numerical Study on interactions of turbulent convection and Radiation in compartment fires // *Fire Sci. Techn.*, 1988. – V. 8, N 1. – P. 15-28.
 131. Hansell G. O., Morgan H. P. Design approaches for smoke control in atrium buildings. Building Research Establishment Report BR258. Building Research Establishment. Garston. UK. – 1994. – 57 p.
 132. Hjertager B.H., Magnussen B.F. Computer simulation of flow, heat transfer and combustion in three-dimensional furnaces // *Arch. Combust.*, 1982. – 2, N 1/2S. – P. 23-48.
 133. Hua J., Wang J., Kumar K. Development of a hybrid field and zone model for fire smoke propagation simulation in buildings // *Fire Safety Journal*. – 2005. – Vol. 40, No. 2. – Pp. 99-119.
 134. Hyde S.M., Moss J.B. Field modelling of carbon monoxide production in fires

- // IN-TERFLAM'99, 1999. – P. 951-962.
135. International Building Cod. / USA. – ICC, 2003. – 660 p.
 136. Jia F., Galea E.R., Patel M.K. The prediction of fire propagation in enclosure fires // Proc. of V Int. Symp. On Fire Safety Science, 1997. – P. 439-450.
 137. Jones W. W. State of the art in zone modeling of fires. National Institute of Standards and Technology (NIST) // 9th International Fire Protection Seminar. – 2001. May 25 and 26. – Munich. – P. 36.
 138. Kamenshchikov L.P., Bykov V.I., Amelchugov S.P. Numerical modelling of distribution of a smoke in increased-storeyed buildings // Proc. of the 2nd Int. Seminar on Fire and Explosion Hazard of Substances and Venting Deflagrations, 11-15 August, Moscow, 1997. – P. 650-659.
 139. Kumar S., Cox G. Mathematical modeling of fires in road tunnels // 5 the Int. Symp. On the aerodynamics and ventilation of venicle tunnels. – Lille (France), 1985. – P. 61-68.
 140. Loughheed G. D. Basic Principles of Smoke Management for Atriums // Construction Technology Update. – 2000. – N. 47. – P. 1-6.
 141. Lubin B. T., Springer G. S. The formation of a dip on the surface of a liquid draining from a tank // Journal Fluid Mech. – 1967. Vol 29, part 2. – Pp.385-390.
 142. Luo M., Beck V. A study of non-flaschover and flaschover fires in a full-scale multi-room building // Fire Safety Jornal. – 1996. – V. 26, N 3. – P. 191-219.
 143. Makhviladze G.M., Roberts J.R., Melikhov V.I. Numerical simulation of sprinkler jet-fire interaction for compartment fires // Proc. of the 2nd Int. Seminar on Fire and Explosion Hazard of Substances and Venting Deflagrations, 11-15 August, Moscow, 1997. – P. 485-494.
 144. Matsuyama K., Mizuno M., Wakamatsu T. Systematic Experiments of Room and Corridor Smoke Filling for Use in Calibration of Zone and CFD Fire Models for Engineering Fire Safety Design of Buildings / K. Matsuyama, // Fire Science and Technology. – 2001. – V. 21, N 1. – Pp. 43-55.
 145. Mc Grattan, K. B. Klein, S. Hostikka, J. Floyd Fire Dynamics Simulator (Version 6) // National Institute of Standards and Technology. Special Publication. 1018. – 2013. – 149 p.
 146. Milke J. A. Effectiveness of High-Capacity Smoke Exhaust in Large Spaces // Journal of Fire Protection Engineering. – 2003. – V. 13, May. – Pp. 111-128.
 147. Mowrer F. W., Williamson R. B. Room fire modeling within a computer-aided

- design framework / International Association for Fire Safety Science. 2nd International Symposium. – 1988. June 13-17. – Tokyo, Japan. – Pp. 453-462.
148. Nam S. Development of a computational model simulating the interaction between a fire plume and a sprinkler spray // *Fire Safety Journal*. – 1996. – V.26, N 3. – P. 157-163.
 149. NFPA 72. National Fire Alarm and Signaling Code. National Fire Protection Association, 2002.
 150. NFPA 92B. 1990 NFPA Technical Committee Reports – Technical Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Areas. – National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1990.
 151. Novozhilov V., Moghtaden B., Fletcher D.F., Kent J.H. Computational Fluid Dynamics Modelling of Wood Combustion // *Fire Safety Journal*. – 1996. – V. 27, N 1. – P. 69-84.
 152. Park S. K., Miller K. W. Random Number Generators: Good ones are hard to find // *Comm. ACM*, 1988. – N 10. Vol. 32. – P. 1192-1201.
 153. Puzach S. V., Nguen Tkhan' Xai. Features of calculating the descent velocity of the lower boundary of the near-ceiling layer in a fire in an atrium // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2010. – No. 5, Vol. 83. – Pp. 942-949. DOI: 10.1007/s10891-010-0418-z.
 154. Ruegg H., Arvidsson T. Fire safety engineering concerning evacuation from buildings. CFFPA-E Guidelines. – Stockholm, 2009. – No. 19. – P. 45.
 155. Saxon R. Atrium buildings: development and design. – London: The Architectural Press, 1983.
 156. Shaodong G., Yang R., Zhang H., Attala M.J. Development of a fire zone model considering mixing behavior // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. – 2009. – Vol. 23, No. 2. – Pp. 327-338.
 157. Smagorinsky, J. General circulation experiments with the primitive equations / J. Smagorinsky // *Month. Weath. Rev.* – 1963. – V. 91. – P. 99-164.
 158. Snegirev A.Yu., Tanklevski L.T. Numerical Models of in Compartments // *Proc. of the 2nd Int. Seminar on Fire and Explosion Hazard of Substances and Venting Deflagrations*, 11-15 August, Moscow, 1997. – P. 257-270.
 159. Spalding, D. B. Older and newer approaches to the numerical modelling of turbulent combustion // *3-rd International Conference on Computers in Reciprocating Engines and Gas Turbines*. – London: IMochE, 1996. – Pp. 25-37.

160. Spalding D.B. Mixing and chemical reaction in steady-state confined turbulent flames // 13 the Symp. (Int.) Combust. The Combust. Institute, Pittsburg, PA. – P. 649-657.
161. Tanaka T., Yamada S. Two layer zone smoke transport model // Fire Science and Technology. – 2004. – V. 23, N 1. – Pp. 21-29.
162. Welch, S., Rubini P. SOFIE: Simulation of Fires in Enclosures / User Guide. United Kingdom: Cranfield University. – 1996. – 340 p.
163. Woodburn P.J., Britter R.E. CFD Simulation of a Tunnel Fire. Part 1, Part 2 // Fire Safety Journal. – 1996. – V. 26, N 1. – P. 35-90.
164. Yaman T., Tanaka T. Smoke control in a large scale spaces / Fire Science and Technology, 1985. v. S. № 1. – P. 41-54.
165. Yang K.T. Role of fire field models as a design for performance-based fire code implamentation // International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes. Editor-In-Chief Professor Chow W.K. The Hong Kong Politechnic University. Hong-Kong, China, 1999, v. 1, N 1. – P. 11-17.
166. Yao J., Fan W., Kohyu S., Daisuke K. Verification and application of field-zone-network model in building fire // Fire Safety Journal. – 1999. – Vol. 33, No. 1. – Pp. 35-44.
167. Yeoh G.H., Yuen R.K., Lo S.M., Chen D.N. On numerical comparison of enclosure fire in multi-compartment building // Fire Safety Journal. – 2003. – Vol. 38. – Pp. 85-94.
168. Zhenghua Yan and Goran Holmstedt. CFD simulation of upward flame spread over fuel surface // Fire Safety Science Proceedingof the Fifth International Symposium, 1997. – P. 345-356.
169. Zhuman F., Hadjisophocleous G. A two-zone fire growth and smoke movement model for multi-compartment buildings // Fire Safety Journal. – 2000. – Vol. 34, Issue 3. – Pp. 257–285.

Приложение I

Свидетельство о поверке лабораторных весов DL – 3000

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«Всероссийский научно-исследовательский институт
метрологической службы»

М
ВНИИМС

**СВИДЕТЕЛЬСТВО
О ПОВЕРКЕ**

№ АТ - 6300

Действительно до
«02» декабря 2014 г.

Средство измерений: Весы DL-3000
НАИМЕНОВАНИЕ, ТИП
фирмы "A&D Company Ltd."

СЕРИЯ И НОМЕР КЛЕЙМА ПРЕДЫДУЩЕЙ ПОВЕРКИ (ЕСЛИ ТАКИЕ СЕРИЯ И НОМЕР ИМЕЮТСЯ)

Заводской номер 15620648

Принадлежащее ООО "ИИ энд ДИ РУС" ИНН 4731547200
НАИМЕНОВАНИЕ ЮРИДИЧЕСКОГО (ФИЗИЧЕСКОГО) ЛИЦА, ИНН

Поверено в соответствии с методикой поверки чгв. ФГУП "ВНИИМС"
НАИМЕНОВАНИЕ И НОМЕР ДОКУМЕНТА НА МЕТОДИКУ ПОВЕРКИ

при следующих значениях влияющих факторов: t = +20,5 °C, влажн. = 42 %
ПЕРЕЧЕНЬ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ,

с применением эталонов: Гири класса точности E2 по ГОСТ 7328-2001
НАИМЕНОВАНИЕ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСХОДНОГО ЭТАЛОНА

и на основании результатов первичной (периодической) поверки признано пригодным к применению по ГОСТ 24104-01, кл. точн. Высший (II)

Поверительное клеймо 

Начальник отдела 
ПОДПИСЬ В.Н. Назаров
И.О. ФАМИЛИЯ

Поверитель 
ПОДПИСЬ Д.А. Григорьева
И.О. ФАМИЛИЯ

«02» декабря 2013 г.

119361 Москва, Озёрная ул., д. 46 телефон/факс: (495) 781-79-56 e-mail: massa@vniims.ru

933917

Приложение II

Свидетельство о поверке анализатора дымовых газов Kane-425

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,
МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ»
(ФБУ «РОСТЕСТ - МОСКВА»)**

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ

№ СП 0312184

Действительно до «12» декабря 2014 г.

Средство измерений анализатор дымовых газов Kane 425
наименование, тип средства измерений

(0-21) % об. доли O₂; (0-4000) ppm CO
диапазон измерений

отсутствует
Серия и номер клейма предыдущей поверки (если такие серия и номер имеются)

заводской номер (номера) 182313003

принадлежащее ИНН
наименование юридического (физического) лица, ИНН

поверено в соответствии с МП РТ 1555-2011
наименование и номер документа на методику поверки

при следующих значениях влияющих факторов: температура воздуха 24 °С,
приводят перечень влияющих факторов, нормированных в документе на методику поверки, с указанием их значений

атмосферное давление 750 мм рт. ст., относительная влажность воздуха 31 %
факторов, нормированных в документе на методику поверки, с указанием их значений

и на основании результатов первичной (периодической) поверки
соответствует описанию типа и признано пригодным к применению.

Поверительное клеймо

Начальник лаборатории № 448
должность руководителя подразделения

В.В. Рыбин
инициалы, фамилия

Поверитель

Е.И. Вишневская
инициалы, фамилия

«12» Декабря 2013 г.

СП № 0312184





Приложение Ш
Акты внедрения результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ
Врио начальника Главного управления
МЧС России по Воронежской области
полковник



М.В. Гусев
2016 года

АКТ

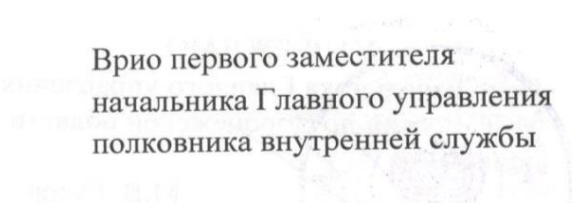
о внедрении результатов диссертационной работы профессора
кафедры пожарной и промышленной безопасности ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный архитектурно-строительный университет»
Колодяжного Сергея Александровича

Результаты диссертационной работы на тему «Прогнозирование времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в многофункциональных центрах», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность (технические науки, отрасль строительство), использованы в практической деятельности служб и подразделений ГУ МЧС России по Воронежской области.

Предметом исследования диссертационной работы является прогнозирование времени блокирования путей эвакуации вследствие возникновения опасных факторов пожара в многофункциональных центрах. Разработанные в диссертации интегральная и зонная модели позволяют определять время блокирования путей эвакуации, которое служит основой проверки выполнения условия безопасной эвакуации людей из многофункциональных центров.

Результаты исследований используются при выполнении комплекса мероприятий, направленных на снижение временных показателей оперативного реагирования на пожарах.

Врио первого заместителя
начальника Главного управления
полковника внутренней службы



Ю. В. Гущин



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«Научно-технический центр «Пожарные инновации»
(ООО «НТЦ «Пожарные инновации»)

Юридический адрес: 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Жуковского, д. 3, тел./факс: (499) 171-15-68
Адрес для корреспонденции: 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Жуковского, д. 3, тел./факс: (499) 171-15-68
ОГРН 1067746262066 ИНН 7721548452

№ _____
На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ООО «НТЦ «Пожарные инновации»
к.т.н., с.н.с.



В.В. Пивоваров

2016 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Колодяжного Сергея Александровича на тему «Прогнозирование времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в многофункциональных центрах», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Колодяжного Сергея Александровича использованы для расчета пожарных рисков при реконструкции ФГУК «Государственный Кремлевский Дворец», расположенного по адресу: г. Москва, Кремль, ГКД.

Разработанные Колодяжным С.А. комплекс уточненных математических моделей термогазодинамики пожара и методика расчета динамики опасных факторов пожара, учитывающих специфику объемно-планировочных и конструктивных решений здания ГКД, работу системы дымоудаления, неустановившуюся скорость выгорания горючих веществ и форму конвективной колонки, образующейся над источником горения, позволили обосновать отступления от норм пожарной безопасности в проектных решениях

Начальник нормативно-технического отдела
к.т.н.

Д.Г. Пронин

« 6 » сентября 2016 г.

исп.: Чикуров Д.В.
Тел. (499) 170-70-22 доб. 340



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

«Научно-технический центр «Пожарные инновации»
(ООО «НТЦ «Пожарные инновации»)

Юридический адрес: 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Жуковского, д. 3, тел./факс: (499) 171-15-68
Адрес для корреспонденции: 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Жуковского, д. 3, тел./факс: (499) 171-15-68
ОГРН 1067746262066 ИНН 7721548452

№ _____
На № _____ от _____

“УТВЕРЖДАЮ”

Генеральный директор
ООО «НТЦ «Пожарные инновации»
к.т.н., с.н.с.


В.В. Пивоваров
« 7 » _____ 2016 г.


АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Колодяжного Сергея Александровича на тему «Прогнозирование времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в многофункциональных центрах», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Колодяжного Сергея Александровича использованы для расчета пожарных рисков при проектировании объекта «Торгово-развлекательный комплекс «Вегас II», расположенного по адресу Московская обл., г. Красногорск, п/о «Красногорск-4», Мякининская пойма, 65-66 км МКАД.

Комплекс уточненных математических моделей расчета динамики опасных факторов пожара, разработанный Колодяжным С.А., позволил обосновать объемно-планировочные и конструктивные решения объекта с точки зрения безопасной эвакуации людей и свести значение пожарного риска к величине, меньшей нормативного значения в соответствии с ФЗ №123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

Начальник нормативно-технического отдела
к.т.н.

Д.Г. Пронин

« 6 » сентября 2016 г.

исп.: Чикуров Д.В.
Тел. (499) 170-70-22 доб. 340



УТВЕРЖДАЮ

Начальник ФГБОУ ВО Воронежский
институт ГПС МЧС России
генерал-майор внутренней службы


А.М. Гаврилов

« 05 » _____ 2016 г.

АКТ

внедрения результатов диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Колодяжного Сергея Александровича «Прогнозирование времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в многофункциональных центрах»

Комиссия в составе: председателя – начальника института генерал-майора внутренней службы Гаврилова Александра Михайловича; заместителя председателя - начальника учебного отдела подполковника внутренней службы Исаева Андрея Александровича; секретаря комиссии - начальника организационно-научного и редакционно-издательского отдела, кандидата технических наук, полковника внутренней службы Шимона Николая Степановича; членов комиссии: начальника кафедры пожарной безопасности технологических процессов, кандидата технических наук, полковника внутренней службы Каргашилова Дмитрия Валентиновича; профессора кафедры государственного надзора, кандидата технических наук, доцента Сметанкиной Галины Июльевны; начальника кафедры пожарной автоматики, кандидата технических наук, подполковника внутренней службы Картавцева Дмитрия Владимировича установила, что результаты диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Колодяжного Сергея Александровича «Прогнозирование времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в многофункциональных центрах» используются в учебно-методическом обеспечении дисциплины «Прогнозирование опасных факторов пожара».

Заместитель председателя комиссии:
Начальник учебного отдела
подполковник внутренней службы



А.А. Исаев

Секретарь комиссии:
Начальник организационно-научного
и редакционно-издательского отдела
полковник внутренней службы



Н.С. Шимон

Члены комиссии:
Начальник кафедры
пожарной безопасности
технологических процессов
полковник внутренней службы

Д.В. Каргашилов

Профессор кафедры
государственного надзора

Г.И. Сметанкина

Начальник кафедры
пожарной автоматики
подполковник внутренней службы

Д.В. Картавец

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО «МИНЭПС»

Шрамов А.В.



« 14 » Июль 2016 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования на тему «Прогнозирование времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в многофункциональных центрах», представленного автором Колодяжным Сергеем Александровичем на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность (технические науки, отрасль строительство)

Результаты, полученные в диссертации профессора кафедры пожарной и промышленной безопасности Воронежского государственного архитектурно-строительного университета Колодяжного С. А., использованы в ООО «МИНЭПС» при проверке технических решений, обеспечивающих безопасную эвакуацию людей из зданий при возникновении пожара.

Разработанная методика расчета времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в многофункциональных центрах, использующая модифицированные интегральную и зонную модели, позволяет спрогнозировать критическое время блокирования путей эвакуации с учетом работы систем вытяжной противодымной и приточной вентиляции, реальных свойств горючих веществ и материалов строительных конструкций, а также формы конвективной колонки.

Результаты диссертационной работы используются при разработке противопожарных мероприятий.

Зам. генерального директора
ООО «МИНЭПС»

Брагин П.Н.

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ООО «Сервис-Безопасность»



Логачев И.А.

04

2016 г.

АКТ
внедрения результатов диссертационной работы профессора кафедры
пожарной и промышленной безопасности Воронежского ГАСУ
Колодяжного Сергея Александровича
«Прогнозирование времени блокирования путей эвакуации опасными
факторами пожара в многофункциональных центрах»

Комиссия в составе: председателя – Логачева И.А., членов Суркова П.А., Логачева В.А. подтверждает, что результаты диссертации Колодяжного С.А., представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность (технические науки, отрасль строительство), использованы в ООО «Сервис-Безопасность» при моделировании протекания пожаров с помощью разработанного в среде пакета Matlab программного комплекса. Внедренный комплекс позволяет рассчитывать значения основных параметров газовой среды при разнообразных условиях протекания пожара с учетом функционирования системы противодымной вытяжной вентиляции и неустановившимся горении жидкости, а также вычислять необходимое время для эвакуации людей, которое имеет определяющее значение при оценке величины пожарного риска.

Председатель:

Логачев И.А.

Члены:

Сурков П.А.

Логачев В.А.

«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор
ООО «ПГС проект»



Телегин А.М.

2018 2016 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Колодяжного С. А.
«Прогнозирование времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в многофункциональных центрах»

Комиссия в составе: председателя – Шеменева М.В., членов Васильева В.И., Ситникова И.В. подтверждает, что результаты диссертационного исследования профессора кафедры пожарной и промышленной безопасности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный архитектурно-строительный университет» Колодяжного Сергея Александровича, представленного на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность (технические науки, отрасль строительство), внедрены в ООО «ПГС проект».

Предложенные автором 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 общественных зданий, для расчета величин пожарного риска, при расчете параметров системы дымоудаления, а также в процессе анализа последствий и экспертизе пожаров.

Результаты исследований используются при определении времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара в помещениях зданий с массовым пребыванием людей.

Председатель:

Шеменев М.В

Члены:

Васильев В.И.

Ситников И.В.