

*На правах рукописи*



Тимохин Василий Вячеславович

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ГАЗИФИЦИРОВАННЫХ  
МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ ДОМОВ

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность  
(технические науки)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» на кафедре процессов горения и экологической безопасности (в составе учебно-научного комплекса процессов горения и экологической безопасности).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Комаров Александр Андреевич**

Официальные оппоненты: **Шебеко Юрий Николаевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБУ ВНИИПО МЧС России,  
научно-исследовательский центр  
нормативно-технических  
проблем пожарной безопасности,  
главный научный сотрудник

**Бугаев Петр Николаевич**  
кандидат технических наук,  
ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ)  
имени И.М. Губкина»,  
кафедра промышленной безопасности и  
охраны окружающей среды, ассистент

Ведущая организация: Санкт-Петербургский университет ГПС  
МЧС России им. Героя Российской  
Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева

Защита диссертации состоится «10» июня 2025 года в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 04.2.002.02 в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России по адресу: адресу: 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:

<https://academygps.ru/upload/iblock/078/wktr4f6oex1lp9aylbfwj6a96p4013mk/Диссертация%20Тимохина%20В.В..pdf>

Автореферат разослан «09» апреля 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Соковнин Артем Игоревич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Бытовой газ, используемый в жилых многоквартирных домах, является энергоэффективным топливом, что обосновывает темпы роста газификации. В частности, государственная программа «Развитие энергетики» предусматривает достижение к концу 2030 года среднего уровня газификации населения Российской Федерации в размере 82,9 %.

Главная опасность при использовании газового оборудования заключается в возможности утечки, с последующим образованием взрывоопасной смеси газа с воздухом. Данный процесс представляют серьезную опасность с точки зрения возможности формирования взрывных нагрузок, критичных для строительных конструкций здания. Следствием данных аварийных ситуаций являются разрушения квартир, обрушение этажей и подъездов жилых зданий. Проведенный статистический анализ данных аварийных ситуаций показал, что, начиная с января 2017 года по декабрь 2023 года в различных субъектах на территории Российской Федерации в жилых многоквартирных домах произошло 163 аварийных взрыва, следствием которых стала гибель 199 человек, число пострадавших – 1129 человек.

Таким образом, необходимость исследований в данной области подтверждается тяжестью последствий взрывов газа в жилых домах, что говорит о важности решаемой научной задачи по повышению уровня взрывобезопасности объектов жилого сектора.

**Степень разработанности темы исследования.** В решение проблемы обеспечения взрывобезопасности и взрывоустойчивости зданий (в том числе жилых многоквартирных домов) существенный вклад внесли отечественные ученые. Так, одним из основоположников направления взрывобезопасности зданий и сооружений является Н.А. Стрельчук. Исследование нестационарного движения газов при наличии в них разрывов, ускорение турбулентного горения газозвоздушных смесей связано с А.В. Мишуевым. Изучением вопроса снижения нагрузок до допустимого уровня и, как следствие, поиском оптимальных параметров предохранительных конструкций занимались Л.П. Пилюгин, Г.Г. Орлов, А.М. Шлег. Значительный вклад в исследование физической картины дефлаграционных взрывов внесли такие ученые, как А.А. Комаров, В.А. Горев, Ю.Х. Поландов. Из зарубежных авторов наибольший научный интерес к рассматриваемой проблеме представляют работы Prendes-Gero M. I., Zhao K., Andreotti, M., Sezer, H.

Однако, несмотря на значительные достижения в области взрывобезопасности, в настоящее время отсутствуют решения и мероприятия, позволяющие предотвратить взрыв, а в случае создания аварийной ситуации снизить величину взрывных нагрузок до уровня, не являющегося критичным для

строительных конструкций здания.

**Целью** исследования является предупреждение и снижение последствий аварийных взрывов газа в жилых газифицированных многоквартирных домах.

В соответствии с целью были сформулированы следующие **задачи**:

1. Проведение анализа аварийных ситуаций со взрывами газозвушных смесей на территории РФ, существующих решений и мероприятий по обеспечению взрывобезопасности жилых газифицированных многоквартирных домов;

2. Разработка математической модели, описывающей процесс формирования взрывоопасных концентраций в помещении малого объема, с использованием экспериментально полученного значения коэффициента турбулентной диффузии;

3. Проведение модельных и натурных экспериментальных исследований в односвязной и многосвязной областях, с целью изучения физической картины внутреннего дефлаграционного взрыва и оценки возможности применения предохранительных конструкций в жилом секторе;

4. Обоснование практического применения полученных результатов при реконструкции сценария развития аварии.

**Объектом исследования** является взрывобезопасность жилых газифицированных многоквартирных домов.

**Предмет исследования** - диффузионные процессы и дефлаграционные взрывы газозвушных смесей в жилых газифицированных многоквартирных домах.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

– на основе проведенных экспериментальных исследований и математических расчетов получено значение коэффициента турбулентной диффузии, характерного для помещения кухни жилого многоквартирного дома;

– разработана математическая модель истечения газа, позволяющая оценить состояние газозвушной среды помещения малого объема в различные моменты времени;

– получены экспериментально подтвержденные факторы формирования взрывных нагрузок при различных сценариях развития аварии, с выявлением особенностей, характерных для дефлаграционных взрывов.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается:

– в использовании разработанной математической модели истечения газа для оценки состояния газозвушной среды помещения;

– в обосновании способа предотвращения формирования взрывоопасных концентраций в жилых газифицированных домах;

– в обосновании целесообразности применения предохранительных конструкций в жилых газифицированных многоквартирных домах, с целью

снижения взрывных нагрузок до уровня, не являющегося критичным для строительных конструкций здания.

**Методология и методы исследования.** В работе использованы следующие методы исследования:

– метод математического моделирования, с целью описания процесса формирования взрывоопасных концентраций и определения отдельных параметров дефлаграционного взрыва;

– метод физического эксперимента, как инструмента по исследованию физической картины дефлаграционного взрыва;

– статистические методы при обработке экспериментальных данных, с целью выявления возможных ошибок.

Для проведения исследования были использованы различные отечественные и зарубежные литературные источники, нормативные документы и материалы аварийных взрывов в жилых многоквартирных домах, что позволило ознакомиться с предыдущими исследованиями и опытом других специалистов и экспертов в области взрывобезопасности.

**Положения, выносимые на защиту:**

– математическая модель истечения газа, разработанная с использованием экспериментально полученного и теоретически обоснованного значения коэффициента турбулентной диффузии, для моделирования процесса формирования взрывоопасных концентраций в помещении;

– способ предотвращения формирования взрывоопасной смеси в помещении;

– результаты модельных экспериментальных исследований процесса дефлаграционного взрыва, с выделением факторов формирования взрывных нагрузок для использования при реконструкции аварийных взрывов;

– результаты натуральных экспериментальных исследований предохранительных конструкций на воздействие взрывных нагрузок, с обоснованием целесообразности применения в жилом секторе.

**Степень достоверности** полученных результатов и выводов, представленных в работе, подтверждается использованием в ходе экспериментальных исследований измерительного оборудования, прошедшего поверку и калибровку в соответствии с установленными стандартами, что гарантирует точность и достоверность полученных измерений; внутренней непротиворечивостью и согласованностью результатов как между собой, так и с результатами экспериментов других авторов в области взрывобезопасности.

**Материалы диссертации реализованы:**

– в Главном управлении МЧС России по Пензенской области для совершенствования уровня подготовки личного состава органов дознания в части,

касающейся изучения вопроса формирования взрывоопасных концентраций и взрывных нагрузок, с целью реконструкции процесса развития аварии при взрывах газоздушных смесей;

– в учебной деятельности Академии ГПС МЧС России при организации и проведении учебных занятий по дисциплине «Теория горения и взрыва» по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность», 20.05.01 «Пожарная безопасность»;

– при выполнении научно-исследовательской работы на тему: «Определение параметров внутреннего дефлаграционного аварийного взрыва»;

– при проведении испытаний предохранительных конструкций поворотного типа с разрушающимися узлами крепления, предполагаемых к использованию на объектах жилого сектора.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены на 10-й Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2021» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2021); 16-й международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность» (г. Иваново, ИПСА ГПС МЧС России, 2021); 30-й международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2021» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2021); 11-й международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2022» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2022); 4-й международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных, преподавателей «Актуальные проблемы техносферной безопасности» (г. Ульяновск, ГТУ, 2022). 15-й научно-практической конференции слушателей и молодых ученых «Экологические проблемы XXI века» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2023); 13-й Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2024» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2024); научно-практической конференции «Академия государственной противопожарной службы МЧС России: теория. инновации. Практика», посвященной 90-летию со дня образования Академии ГПС МЧС России (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2023).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе 5 – в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК России. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура, объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Содержание работы изложено на 124 страницах текста, включает в себя 16 таблиц, 75 рисунков, список литературы из 125 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, определены цель, задачи, объект и предмет исследования. Показана научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость. Представлены положения, выносимые на защиту, и сведения о внедрении и апробации результатов работы.

**В первой главе** «Аналитический обзор подходов к обеспечению взрывобезопасности жилых газифицированных многоквартирных домов» выполнен краткий анализ аварийных ситуаций со взрывом газо-воздушных смесей в жилых газифицированных многоквартирных домах.

Проведенный статистический анализ данных по чрезвычайным ситуациям, связанными со взрывом бытового газа, показал, что, начиная с января 2017 года по декабрь 2023 года в различных субъектах на территории Российской Федерации в жилых многоквартирных домах произошло 163 аварийных взрыва (рисунок 1), последствия которых следующие:

- пострадало 1129 человек, погибло 199 человек (рисунок 2);
- сумма материального ущерба составила около 429 млн. рублей.

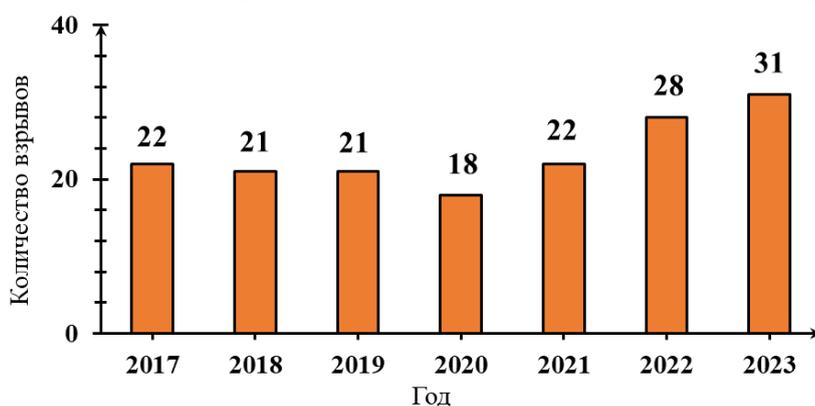


Рисунок 1 – Количество взрывов в жилых многоквартирных газифицированных домах

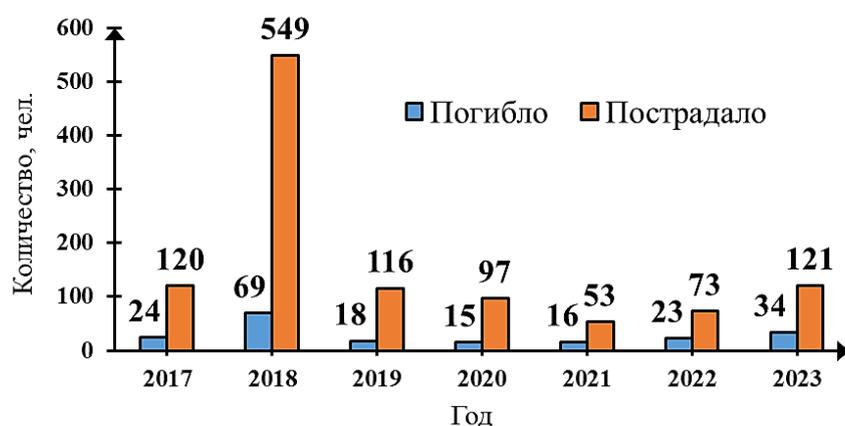


Рисунок 2 – Динамика числа погибших и пострадавших при взрывах в жилых домах

В рамках данного анализа были установлены основные причины аварийных взрывов, происходящих в жилых многоквартирных домах. Данные причины можно условно разделить на две составляющие: к первой группе

относятся причины, связанные с деятельностью человека (человеческий фактор); вторая группа причин аварийных взрывов связана с неисправностью газового и вентиляционного оборудования.

Кроме того, в данной главе рассмотрены существующие мероприятия по обеспечению взрывобезопасности жилых домов:

– мероприятия по исключению возможности формирования взрывоопасной смеси, направленные на предотвращение возможного взрыва;

– мероприятия по снижению взрывных нагрузок до допустимого уровня, направленные на снижение последствий взрыва.

Обзор существующих технических решений и мероприятий по предупреждению взрыва, приводимых в данной главе, позволил сделать вывод о необходимости дальнейшей работы по исследованию параметров внутренних аварийных взрывов бытового газа в жилых домах, при различных сценариях протекания аварии, с целью разработки оптимальных решений и мероприятий, позволяющих с высокой вероятностью предотвратить аварийный взрыв или снизить величину взрывных нагрузок до допустимого уровня.

**Во второй главе** «Физическая картина внутреннего дефлаграционного взрыва» представлены результаты экспериментальных исследований по формированию взрывоопасных концентраций в полномасштабном помещении кухни многоквартирного дома.

Установлено, что на формирование газо-воздушных смесей горючих веществ влияют: коэффициент турбулентной диффузии; параметры источников аварийных выбросов (характерная площадь утечки, расход, давление, количество, место расположения); физические свойства газо-воздушных смесей; условия окружающей среды (наличие подвижности воздуха, месторасположение ограждающих конструкций и пр.).

Математическое описание процесса в части распределения концентрации вещества по объему и его изменение во времени описывается уравнением диффузии:

$$\frac{dC}{dt} = D_x \frac{d^2C}{dx^2} + D_y \frac{d^2C}{dy^2} + D_z \frac{d^2C}{dz^2} + \frac{dQ}{dV_{см}} - div(\vec{v}C), \quad (1)$$

где  $C$  – объемная концентрация вещества в смеси, %;

$D$  – коэффициент диффузии для различных направлений,  $m^2/c$ ;

$Q = q - L_{вент} \cdot C$  – объемный расход вещества,  $m^3/c$ ;

$q$  – расход метана через аварийное отверстие,  $m^3/c$ ;

$L_{вент}$  – вентиляционный расход,  $m^3/ч$ ;

$v$  – скорость воздушного потока в помещении,  $m/c$ ;

$x, y, z$  – пространственные координаты;

$t$  – время,  $c$ ;

$V_{см}$  – объем смеси,  $m^3$ .

Решение данного уравнения является ключевой составляющей для анализа причин и понимания сценария аварии в целом. В частности, необходимо рассмотреть вопрос формирования взрывоопасного облака и экспериментально оценить величину коэффициента турбулентной диффузии как одной из основных

величин формирования газо-воздушной среды. С этой целью были проведены эксперименты на полноразмерном помещении, оборудованном источником газа.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем: в качестве экспериментальной области было принято помещение с размерами  $3,0 \times 2,0 \times 2,5$  м; в трех точках данного помещения были расположены датчики концентрации, служащие для подачи звукового сигнала при превышении концентрации газовой смеси значения  $0,05$  % (об.). В качестве газа использовался метан. Подача в помещение осуществлялась из емкости с суммарным расходом  $130,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с. С помощью секундомера фиксировалось время сигнализации датчиков о превышении контрольного значения концентрации.

Перед работой над экспериментальной частью исследований были проведены расчеты для приблизительной оценки порядка значения коэффициента турбулентной диффузии. В качестве начального значения коэффициента турбулентной диффузии была принята величина, соответствующая коэффициенту молекулярной диффузии для метана ( $D = 2 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с). На рисунке 3 приведены схемы проведения экспериментов с указанием расположения точек фиксации концентрации ( $T_1, T_2, T_3$ ) и положения источников газа, имитирующих утечку из двух газовых конфорок ( $Q_1, Q_2$ ). Время срабатывания газоанализаторов определялось в трех точках, расположенных на уровне пола помещения при  $z = 0,05$  м (1-я серия экспериментов) и на уровне источника истечения при  $z = 0,90$  м (2-я серия экспериментов). Результаты исследований представлены в таблице 1.

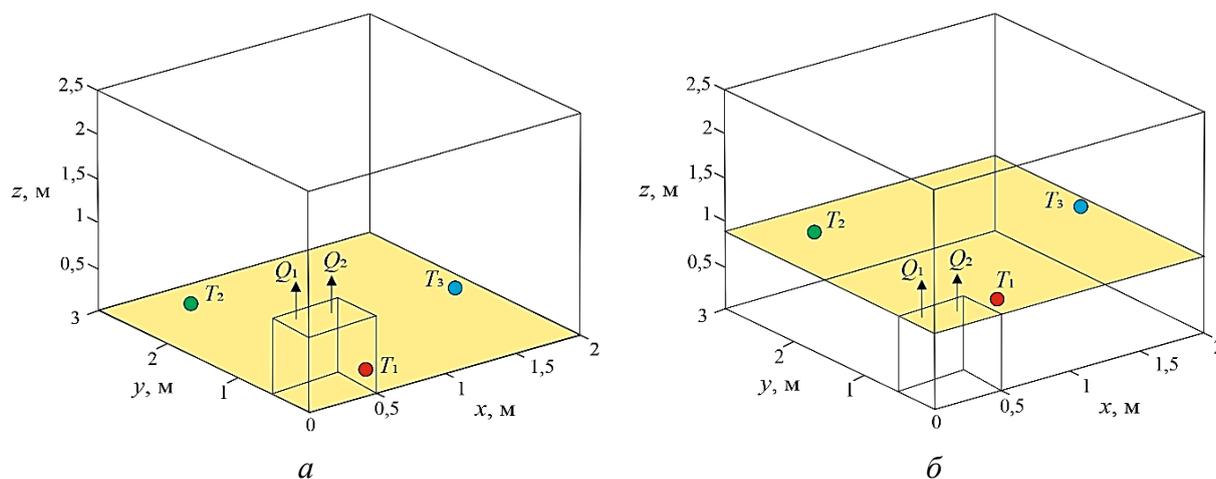


Рисунок 3 – Схема проведения эксперимента  
 а – при  $z = 0,05$  м; б – при  $z = 0,90$  м

Таблица 1 – Результаты расчета при определении порядка величины  $D$

Значение $D$ , м <sup>2</sup> /с	Расчетные значения времени достижения концентрации в точках		
	$T_1$ , с	$T_2$ , с	$T_3$ , с
$2 \cdot 10^{-5}$	-	-	-
$2 \cdot 10^{-4}$	450	> 10 мин.	> 10 мин.
$2 \cdot 10^{-3}$	90	190	310
$2 \cdot 10^{-2}$	41	50	53
$2 \cdot 10^{-1}$	100	100	100

В результате выполненных экспериментальных исследований было установлено, что время достижения концентрации в  $T_1$  составило 86 с,  $T_2$  - 148 с,  $T_3$  - 227 с. Приводимые результаты позволяют сделать вывод о том, что значение коэффициента турбулентной диффузии в помещении кухни с типовыми размерами составляет величину порядка  $D = 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с. Для более точного и детального определения коэффициента турбулентной диффузии в помещении стандартной кухни были проведены измерения и расчеты, результаты которых представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Результаты расчета при  $z = 0,05$  м

Значение $D$ , м <sup>2</sup> /с	Расчетные значения времени достижения концентрации в точках		
	$T_1$ , с	$T_2$ , с	$T_3$ , с
$4 \cdot 10^{-3}$	109,5	148,3	235,4
$5 \cdot 10^{-3}$	94,8	131,1	203,5
$6 \cdot 10^{-3}$	86,2	120,1	184,8

В результате выполненных экспериментальных исследований при  $z = 0,05$  м было установлено, что время достижения концентрации в  $T_1$  составило 93 с,  $T_2$  - 131 с,  $T_3$  - 238 с.

Таблица 3 – Результаты расчета при  $z = 0,90$  м

Значение $D$ , м <sup>2</sup> /с	Расчетные значения времени достижения концентрации в точках		
	$T_1$ , с	$T_2$ , с	$T_3$ , с
$4 \cdot 10^{-3}$	107,4	149,7	243,9
$5 \cdot 10^{-3}$	94,4	134,3	214,8
$6 \cdot 10^{-3}$	79,7	118,5	184,7

В результате выполненных экспериментальных исследований при  $z = 0,90$  м было установлено, что время достижения концентрации в  $T_1$  составило 86 с,  $T_2$  - 148 с,  $T_3$  - 227 с.

Далее, на основе полученных данных, посредством расчета производилось уточнение величины коэффициента турбулентной диффузии. На рисунке 4, в целях понимания показана условная схема проведения линейной экстраполяции для определения коэффициента турбулентной диффузии в помещении кухни при измерении времени срабатывания газоанализатора в  $T_1$ , в ходе эксперимента при  $z = 0,90$  м.

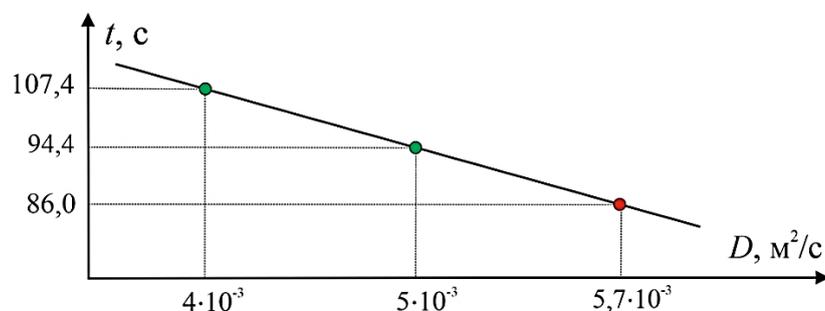


Рисунок 4 – Схема проведения линейной экстраполяции

Сводные данные по результатам двух серий экспериментальных исследований представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Итоговые результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента турбулентной диффузии

Высота плоскости $z$ , м	Значение $D$ , м <sup>2</sup> /с		
	$T_1$	$T_2$	$T_3$
0,05	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
0,90	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что коэффициент турбулентной диффузии, используемый для моделирования процесса формирования взрывоопасных концентраций, значительно превышает коэффициент молекулярной диффузии и составляет не менее  $D = 4 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с. Среднее значение при расположении газоанализатора на уровне пола ( $z = 0,05$  м) составило величину  $D = 4,7 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с; при расположении газоанализатора на уровне источника истечения газа ( $z = 0,90$  м) величину  $D = 4,8 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с.

Приводимые ранее результаты были использованы при разработке математической модели, описывающей процесс формирования взрывоопасных концентраций в помещении малого объема. На рисунке 5 показана зависимость роста концентрации от расхода системы вентиляции, полученная с использованием данной модели. Моделирование проводилось в помещении размерами  $3 \times 2 \times 2,5$  м, при значении коэффициента турбулентной диффузии  $D = 4 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с. Расход газа соответствовал расходу типовой конфорки газовой плиты ( $Q_k = 0,18$  м<sup>3</sup>/ч).

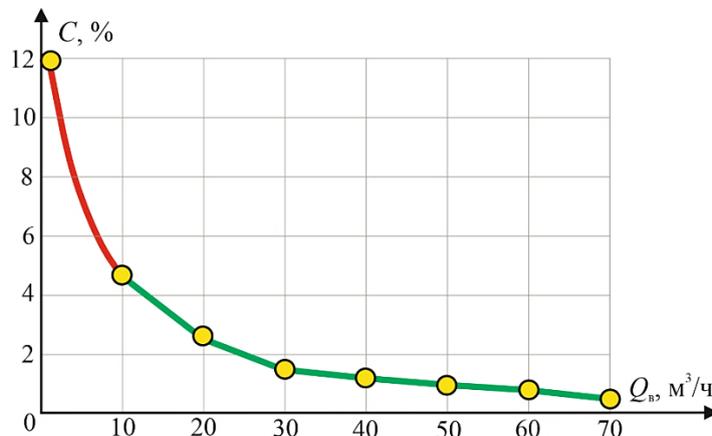


Рисунок 5 – Зависимость концентрации от вентиляционного расхода

Данная зависимость наглядно демонстрирует, что образование взрывоопасной концентрации при утечке из одной конфорки возможно при вентиляционном расходе  $10$  м<sup>3</sup>/ч и менее. На основе данного вывода можно предположить, что выполнение системой вентиляции заданных функций ( $70$  м<sup>3</sup>/ч) позволяет говорить о невозможности формирования взрывоопасных концентраций при утечке из одной газовой конфорки. Однако в ходе наблюдения за изменением вентиляционного расхода в течение суток исследований было установлено, что значения вентиляционного расхода в течение суток изменяются по циклической зависимости. Так, для раннего утра характерно минимальное значение вентиляционного расхода (особенно в период относительного равенства

температур, ввиду работы системы отопления в межсезонье). Пик вентиляционного расхода наступает около 19 ч, после чего вновь начинает снижаться по циклической зависимости. Данное явление в сопоставлении с изменением концентрации во времени представлено на рисунке 6.

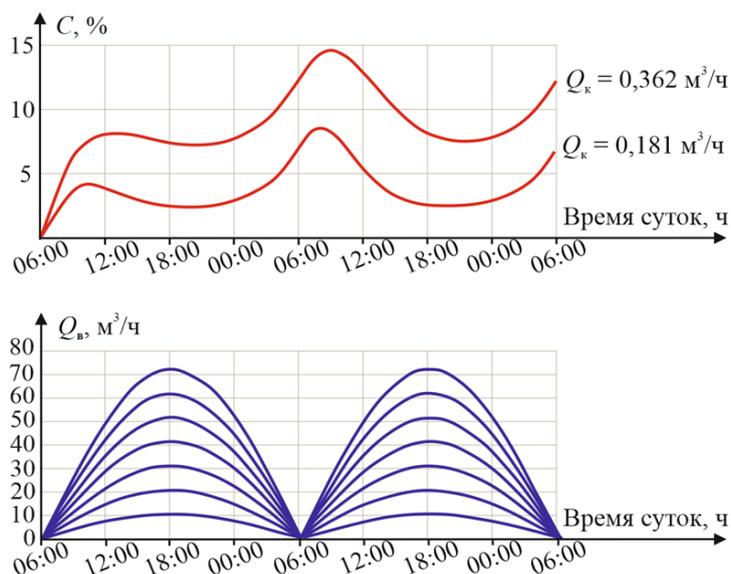


Рисунок 6 – Зависимость концентрации от вентиляционного расхода в течение суток

Сводная зависимость концентрации от расхода газа и вентиляционного расхода представлена на рисунке 7.

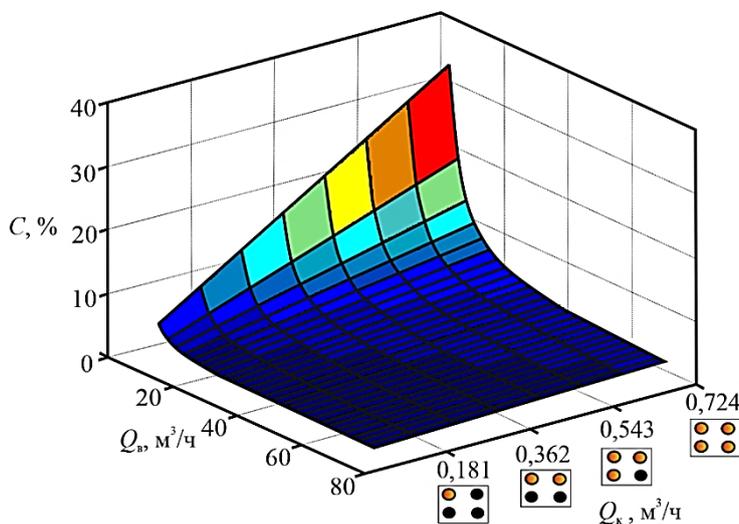


Рисунок 7 – Зависимость концентрации от расхода газа и вентиляционного расхода

Анализ данных зависимостей позволяет сделать следующий вывод: образование взрывоопасных концентраций возможно при утечке из одной конфорки газовой плиты ( $Q_k = 0,18 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), при условии минимального значения вентиляционного расхода в помещении: время образования взрывоопасных концентраций в данном случае составляет не менее 10 ч. Однако вероятность «опрокидывания» вентиляции в течение суток говорит о невозможности исключения риска поступления газа в объем помещения. В связи с этим в рамках

работы предлагается способ исключения возможности формирования взрывоопасной смеси. Данный способ предполагает комплексное решение, гарантирующее своевременное оповещение, перекрытие подачи газа и удаление газа, поступившего в объем помещения. Различные варианты функционирования данной системы представлены на рисунке 8. При поступлении газа в объем помещения из источника истечения (1) происходит срабатывание системы контроля загазованности и оповещения (2), с автоматической передачей сигнала на перекрытие подачи газа посредством отсечного газового клапана (3), устанавливаемого на гибкий газопровод, отходящий от основного стояка (4). Параллельно происходит передача сигнал на элементы системы вентиляции в зависимости от используемой схемы (схема а – элемент 5, схема б – 5,6, схема в – 7), что обеспечивает своевременное удаление газа из помещения.

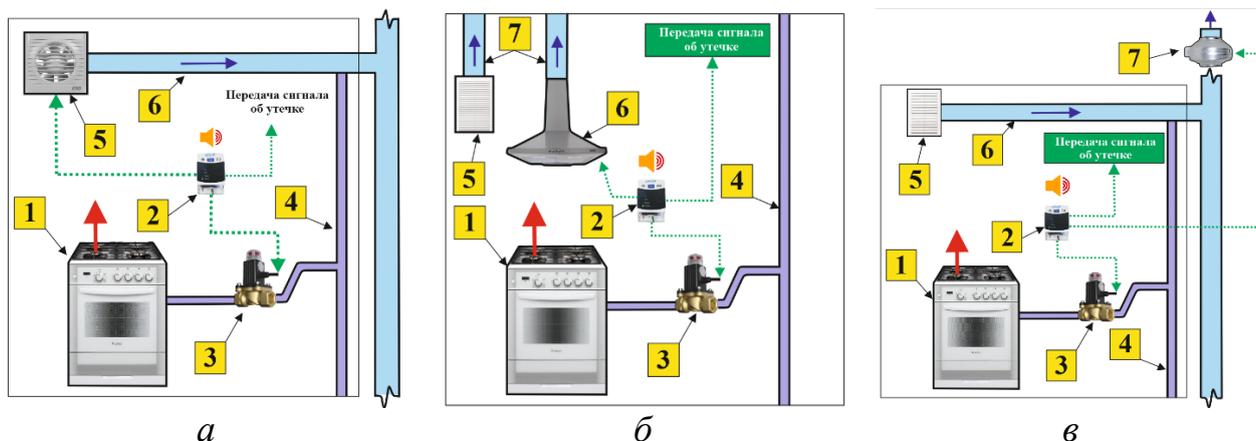


Рисунок 8 – Варианты реализации способа предотвращения формирования взрывоопасной смеси:

- а – использование вытяжного вентилятора с механическим побуждением;
- б – использование вентиляционного отверстия и вытяжной системы;
- в – использование вентиляционного отверстия с каналным вентилятором

Как видно из представленного рисунка, предлагаемый способ предотвращения формирования взрывоопасной смеси предусматривает несколько вариаций исполнения, в зависимости от используемого оборудования. Предполагается, что это добавит вариативности при проектировании подобных систем в жилых домах.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований по изучению процесса формирования взрывоопасных концентраций позволяют говорить о важности системы вентиляции как основного мероприятия по предупреждению аварийного взрыва. Разработанная математическая модель с использованием полученного коэффициента турбулентной диффузии адекватно описывает распространение газа по помещению и может быть использована на этапе проектирования и отладки системы вентиляции, в том числе в рамках текущих проверок по контролю за состоянием системы жилого дома.

Помимо описанных выше исследований по изучению формирования взрывоопасных концентраций, в данной главе приводятся результаты исследования параметров дефлаграционного взрыва в экспериментальной модельной камере, основные элементы которой представлены на рисунке 9.

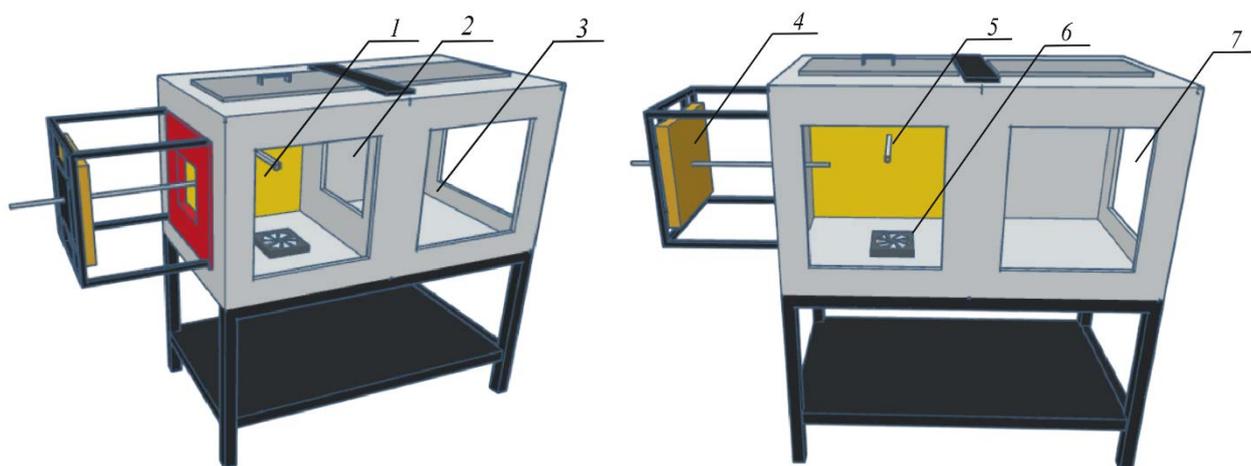


Рисунок 9 – Принципиальная схема экспериментальной установки

1 – камера № 1, в объем которой подается газ; 2 – разделяющий камеры проем; 3 – камера № 2;  
 4 – предохранительная конструкция камеры № 1; 5 – источник зажигания (искра);  
 6 – система перемешивания; 7 – сбросной проем камеры № 2

Первая серия экспериментов была посвящена изучению дефлаграционного взрыва в односвязной области. Это позволило детально изучить динамику формирования взрывных нагрузок при сценарии, когда помещение, в котором произошла утечка, не сообщается с другими помещениями. Данная ситуация была воспроизведена в лабораторных условиях. Методика проведения эксперимента следующая: во взрывную камеру ( $V = 125$  л) с установленной на сбросной проем предохранительной конструкцией, посредством ротаметра подавалось необходимое для создания стехиометрической смеси количество газа. В рамках исследования дефлаграционного взрыва в односвязной области проводилось шесть экспериментов. На рисунке 10 показан процесс горения газозудной смеси в различные моменты времени для одного из проводимых экспериментов.

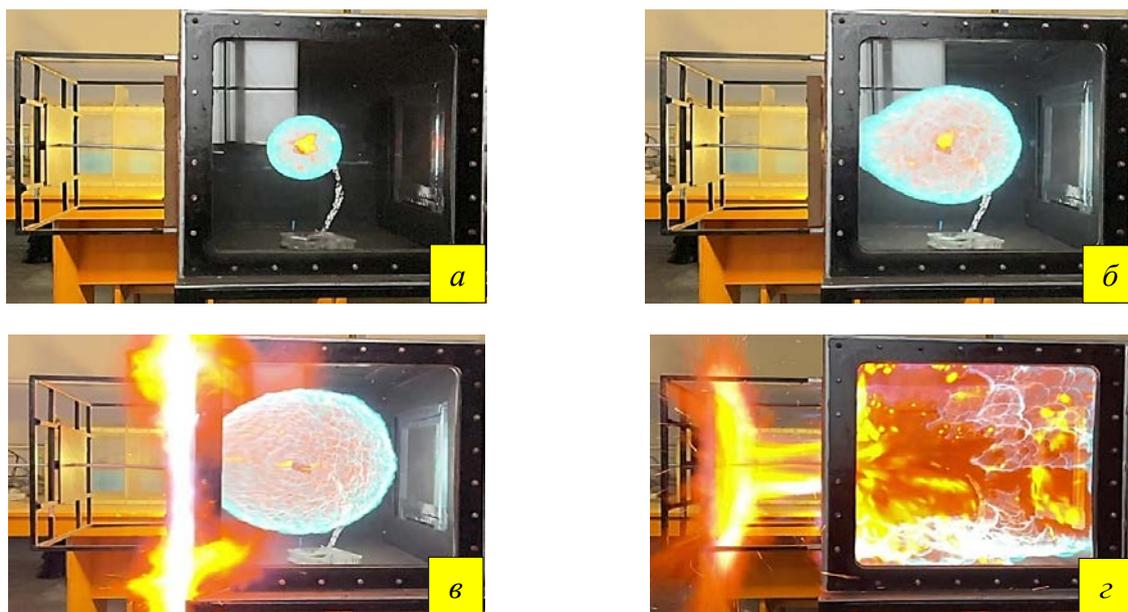


Рисунок 10 – Процесс горения газозудной смеси в односвязной области

На рисунке 11 показана осциллограмма взрывного давления, с указанием точек процесса взрыва в сопоставлении с рисунком 10.

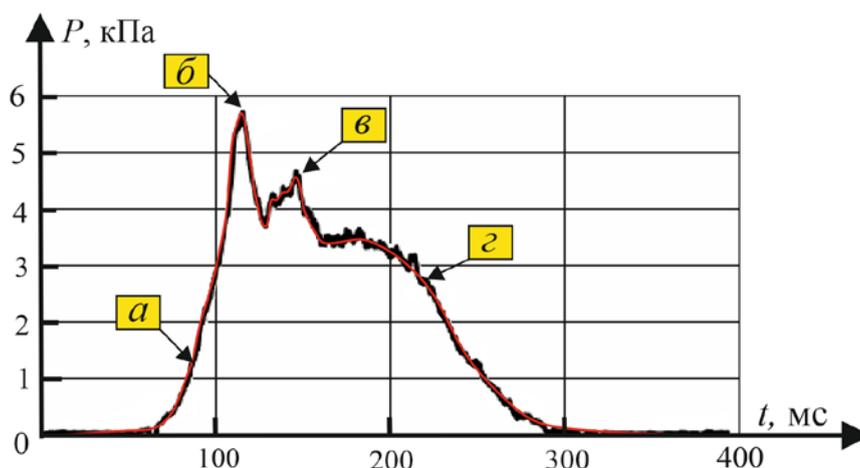


Рисунок 11 – Осциллограмма взрывного давления при взрыве в односвязной области

Во второй серии экспериментов изучался сценарий, при котором помещение, в котором произошла утечка, сообщается с другими помещениями, то есть является многосвязным (смежным). Объем подаваемого газа в данном эксперименте составлял  $V = 15$  л, с целью моделирования ситуации при длительной утечке и создания богатой смеси в помещении утечки. Перед инициированием смеси открывалась перегородка между камерами, имитируя перетекание смеси.

В рамках исследования дефлаграционного взрыва в многосвязной области проводилось два эксперимента. На рисунке 12 показан процесс горения газовой смеси в различные моменты времени для одного из экспериментов.

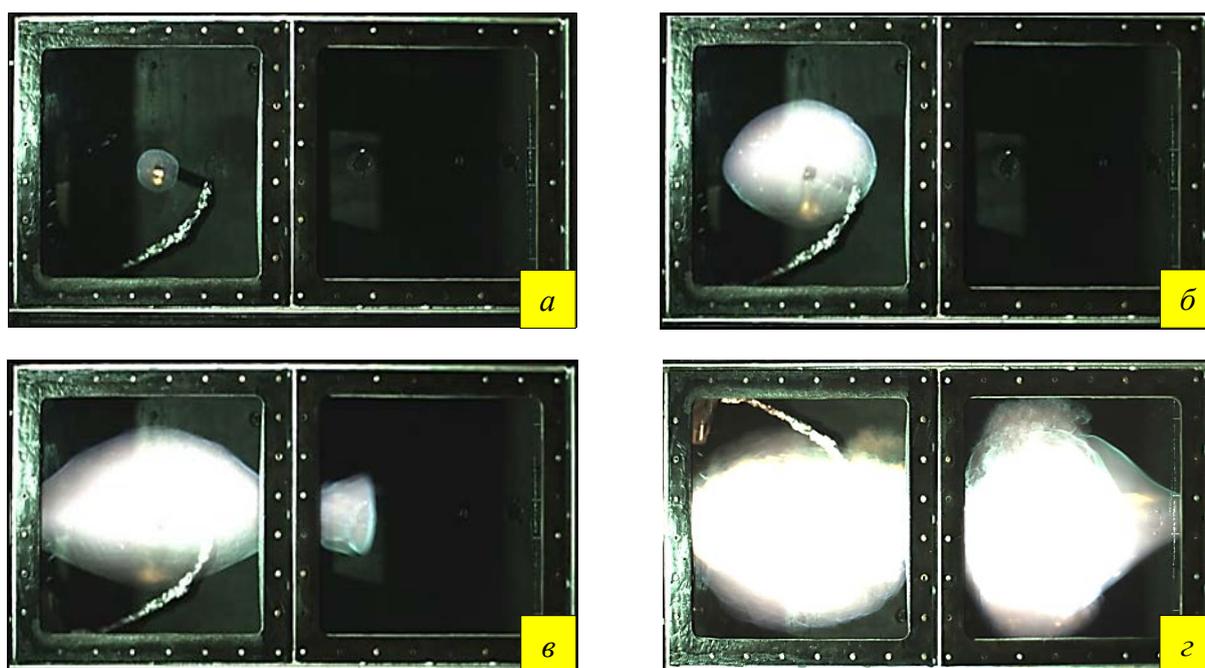


Рисунок 12 – Процесс горения газовой смеси в односвязной области

На рисунке 13 показана осциллограмма взрывного давления, с указанием точек процесса взрыва в сопоставлении с рисунком 12.

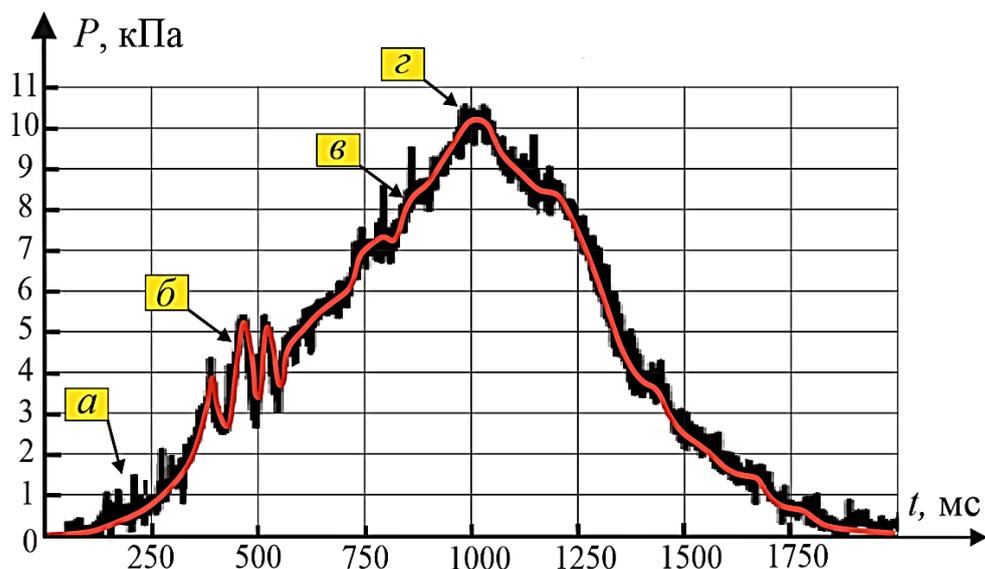


Рисунок 13 – Осциллограмма взрывного давления при взрыве в многосвязной области

Вскрытие предохранительной конструкции (далее – ПК) в камере № 2 для данного эксперимента привело не к снижению, а к существенному росту взрывных нагрузок. Разница величины давления в камерах привела к значительному последовательному росту скорости струи и, как следствие, скорости турбулентного горения. Продукты взрыва при данном эксперименте превысили объем продуктов, истекающих в атмосферу после вскрытия ПК, что в конечном итоге привело к существенному росту взрывного давления, почти в 2 раза в сравнении с экспериментом в односвязной области.

Таким образом, на развитие взрывной аварии в жилых домах оказывают влияние ряд факторов. Результаты экспериментальных исследований, полученные для сценария внутреннего взрыва в односвязной области, позволили сделать вывод о том, что при вскрытии оконных проемов энергия взрыва выходит за внутренний объем помещения, что способствует снижению величины давления. Это говорит о важности остекления оконных проемов с точки зрения обеспечения взрывобезопасности жилых домов и необходимости дальнейшей работы в данной области. Экспериментальные исследования в части многосвязных областей показали значительное влияние «эффекта смежности» помещений на рост взрывных нагрузок. Перетекание смеси в коридор или соседние помещения может привести к более тяжелым последствиям, что подчеркивает важность понимания физической картины дефлаграционного взрыва при реконструкции аварии.

**В третьей главе «Экспериментальное исследование предохранительных конструкций на воздействие взрывных нагрузок»** приводятся результаты натурных испытаний предохранительных конструкций, с целью оценки эффективности при использовании в помещениях малого объема, характерных для жилых многоквартирных домов.

В рамках данной главы проводились экспериментальные исследования на камере, объем которой приближен к объему типовой кухни многоквартирного дома (рисунок 14). В качестве заполнения оконного проема использовалась предохранительная конструкция поворотного типа, площадью  $1,08 \times 1,08$  м, масса которой составляла около 25 кг.

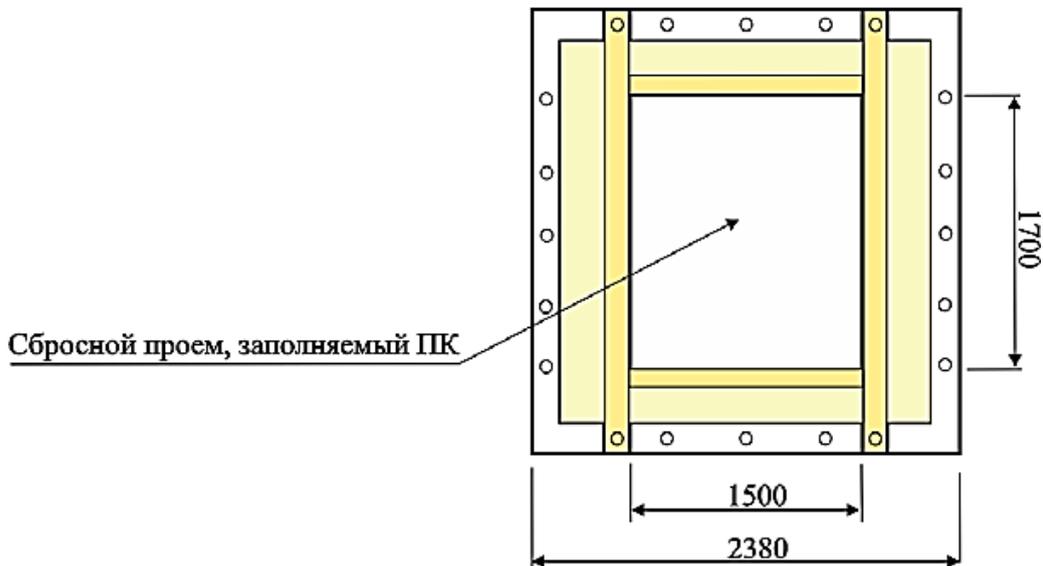


Рисунок 14 - Схема фронтальной части камеры

Смесь зажигалась искрой, находящейся в центре камеры. Взрывное давление фиксировалось двумя датчиками. Один из них располагался в центре боковой грани куба, второй датчик был расположен на противоположной грани куба вблизи грани со сбросным проемом (фанерным) в верхней части грани. Фиксация процесса взрыва осуществлялась двумя скоростными камерам.

На рисунке 15 приводится осциллограмма взрывного давления в камере.

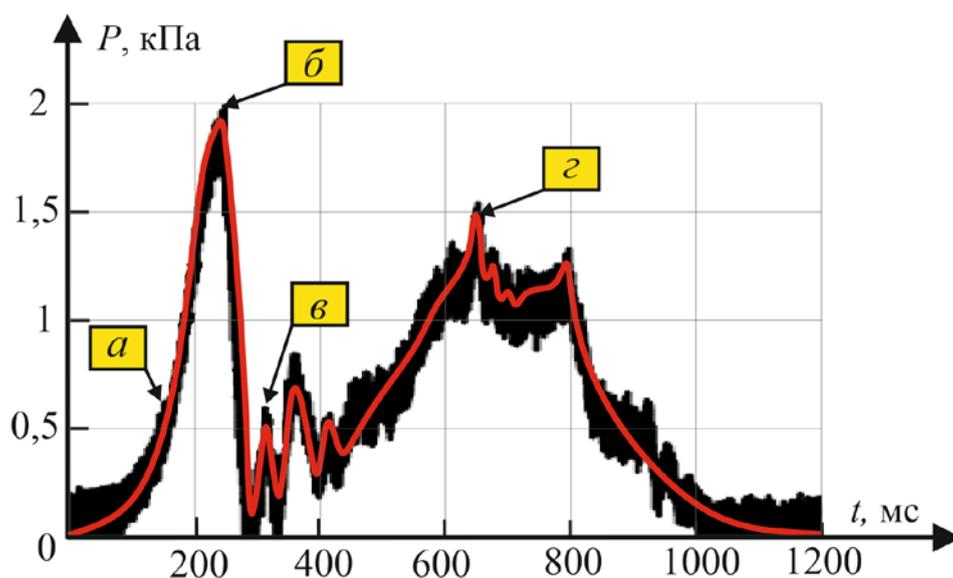


Рисунок 15 - Осциллограмма взрывного давления

На рисунке 16 приведены фотографии некоторых моментов

проводимых испытаний, с указанием точек процесса взрыва в сопоставлении с рисунком 15.

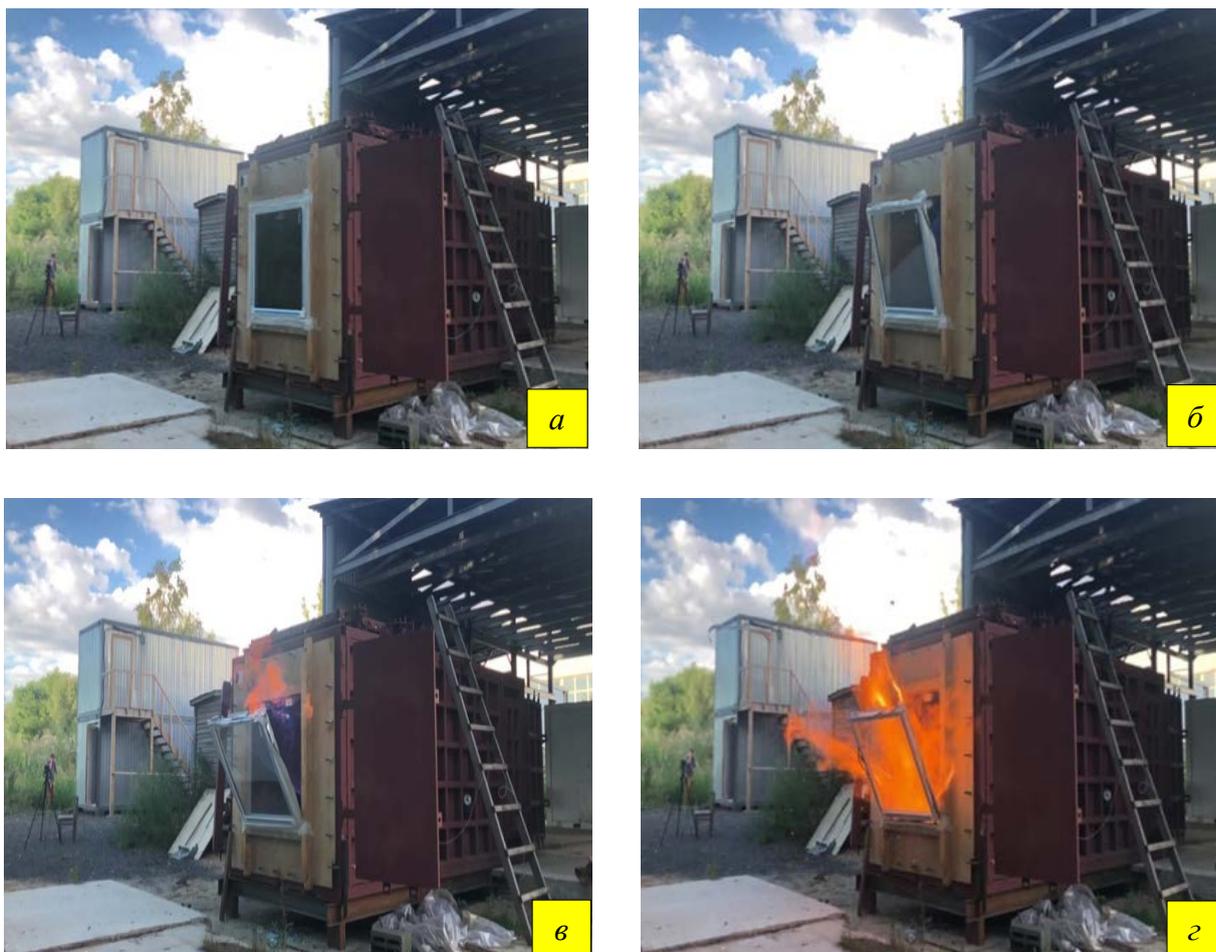


Рисунок 16 – Кадры отдельных моментов проводимых испытаний

Проведенные экспериментальные исследования в натурной камере позволили сделать вывод о том, что использование предохранительных конструкций, обеспечивающих вскрытие оконного проема при заданном давлении, позволит решить проблему взрывобезопасности жилых домов с точки зрения снижения взрывных нагрузок до допустимого уровня, так как максимальное взрывное давление 1,87 кПа не является критическим для строительных конструкций жилых зданий.

**В четвертой главе «Теоретические аспекты реконструкции аварийных ситуаций»** рассматриваются отличительные особенности восстановления сценария аварийных взрывов, с обоснованием применения результатов исследования на примере реальной аварийной ситуации.

Важным аспектом при реконструкции аварийных ситуаций, связанных с взрывом бытового газа, является понимание сценария аварии, который является ключом к установлению причины взрыва.

Проведенные модельные и натурные экспериментальные исследования позволили выявить основные факторы, от которых зависит величина избыточного давления:

- количества газа, поступившего в помещение;

- планировки помещений квартиры;
- расположение и энергия источника зажигания;
- типа остекления оконных проемов;
- состояния дверных проемов во время утечки. Обоснование данного фактора нашло отражение во второй главе настоящей работы. При реальных взрывах эффект «смежности» проявляется в значительных разрушениях помещений без потенциальных источников утечки, что принципиально отличает аварийный взрыв газа от пожара, где наибольшие термические повреждения зачастую указывают на место очага;
- материал несущих конструкций здания. Необходимо отметить, что каркасные и монолитные здания более устойчивы к действию взрыва, нежели кирпичные. Вызвано это тем, что кирпичная кладка, обладая высокой несущей способностью в вертикальном (эксплуатационном) направлении, практически не сопротивляется, горизонтальным (взрывным) нагрузкам. Кроме того, кирпичные стены, как правило, являются несущими конструкциями и при их прогибе под действием взрывных нагрузок происходит потеря их устойчивости. В каркасных и монолитных зданиях при аварийных взрывах возможен срыв стеновой панели, но здание в целом сохраняет большую устойчивость.

С целью наглядной демонстрации и реконструкции развития подобных аварийных ситуаций в данной главе рассматривается реальный аварийный взрыв газа в жилом многоквартирном доме (рисунок 17).



Рисунок 17 – Повреждения конструкций при рассматриваемой аварии

Обстоятельства произошедшей аварии следующие. Около 08:00 утра в торцевой квартире на 1 этаже 4-х этажного панельного жилого газифицированного дома произошел взрыв. Как видно из представленного на рисунке 18 плана, лоджия была разделена перегородкой и имела два входа: основной вход со стороны спальни через дверь и вход со стороны кухни через арочный проем – таким образом искусственно увеличивался объем кухни, о чем говорит установленная и обозначенная на плане газовая плита.

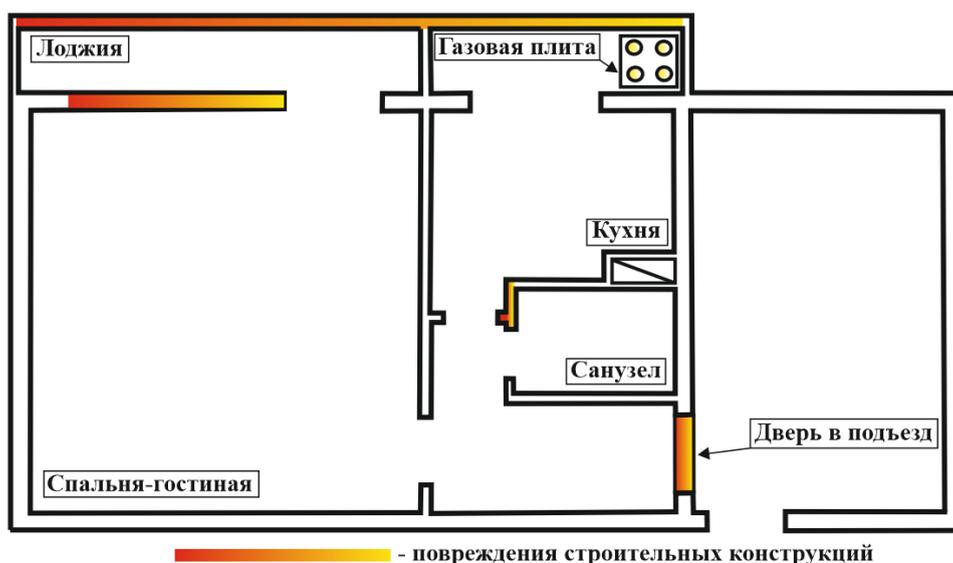


Рисунок 18 – План-схема квартиры и прилегающего подъезда с указанием мест повреждения строительных конструкций

Были рассмотрены следующие возможные сценарии аварии.

Сценарий 1 – утечка из конфорок. Предполагается, что формированию взрывоопасного облака способствовала утечка газа вследствие затухания конфорок газовой плиты; появление источника зажигания инициировало воспламенение и последующий взрыв. В материалах следствия содержится информация о том, что две конфорки газовой плиты находились в положении подачи газа. Время фиксации данной информации не указано, что не позволяет говорить о высокой вероятности формирования облака вследствие именно данной причины утечки. Так, изменение положения переключателей газовой плиты теоретически может быть объяснено ненамеренными действиями аварийно-спасательных (газовых) служб при ликвидации аварии.

Теоретически, взрывоопасная концентрация может реализовываться при утечке из одной конфорки (для типовой плиты величина расхода составляет около  $q = 0,18 \text{ м}^3/\text{ч}$ ). Однако время формирования достаточно велико и варьируется от 10 до 25 ч, в зависимости от вентиляционного расхода в помещении, что подтверждено натурными экспериментальными исследованиями, приводимыми в работе – вероятность формирования взрывоопасной смеси при подобном сценарии крайне низка, так как расход газа из конфорок достаточно низок для формирования (и перетекания в соседние помещения) газовой смеси взрывоопасной концентрации за рассматриваемый промежуток времени (со слов хозяйки, запах газа в вечернее время не ощущался), составляющий около 6-8 часов (при условии утечки из 2-х газовых конфорок). Кроме того, анализ последствий взрыва позволяет говорить о достаточном количестве газа для реализации двух-стадийного (смежного) взрыва (что подтверждается повреждениями в гостиной, санузле и коридоре).

Таким образом, реализация данного сценария при рассматриваемой аварии маловероятна.

Сценарий 2 – утечка в результате залпового выброса из подводящего газопровода. Предполагается, что утечка произошла в результате обрыва (разгерметизации) подводящего газопровода, вызвав залповый выброс газа с последующим инициированием смеси (аналогично сценарию №1). Оценить состояние подводящего газопровода сразу после произошедшей аварии не представляется возможным, так как в представленных материалах труба стояка срезана (вероятно, прибывшими аварийными или газовыми службами при ликвидации). Тем не менее, именно данный сценарий наиболее адекватен с точки зрения времени истечения для формирования смеси. Расход газа при залповом выбросе из газопровода существенно выше, чем при утечке из газовых конфорок. Как уже говорилось ранее, количество поступающего газа в данной аварии достаточно велико для распространения в соседние помещения – вероятнее всего, после инициирования в помещении кухни, произошло выдавливание смеси через дверной проем, с последующей турбулизацией и обогащением кислородом.

В результате было сформировано хорошо подготовленное к горению взрывоопасное облако, которое через незначительный промежуток времени привело к вторичному взрыву.

Говоря о самой причине обрыва необходимо отметить небольшую деталь, содержащуюся в материалах следствия. Со слов жильцов, недавно в дом был установлен новый газовый счетчик, вблизи которого ощущался запах газа (счетчик был установлен с противоположной стороны относительно квартиры, в которой произошел аварийный взрыв). В частности, интерес представляют слова жильцов о «вспыхивающем» и «неравномерно горящем» огне, что возможно связано с нарушением подачи газа на фоне установки данного прибора и, как следствие, возможной причиной произошедшего обрыва.

Сценарий 3 – детонационный взрыв. Предполагается, что утечки газа из приборов не было; повреждения строительных конструкций вызваны взрывом конденсированного взрывчатого вещества, с детонационным сценарием протекания аварийного взрыва. Реализация данного сценария наименее вероятна, но требует рассмотрения с точки зрения исключения детонации взрывчатых веществ как причины взрыва. Физическая картина произошедшего аварийного взрыва характерна именно для дефлаграционного горения, о чем позволяют судить представленные фотоматериалы и обстоятельства произошедшего, что исключает реализацию данного сценария.

Результаты анализа условий формирования взрывоопасных концентраций для данной аварии позволяют говорить о том, что наиболее вероятной причиной поступления в помещение газа в необходимом для взрыва объеме является обрыв (разгерметизация) подводящего газопровода. Рассмотренный сценарий реальной аварии, приводимый в данной главе, позволяют говорить о том, при расследовании подобных аварийных ситуаций особую остроту приобретает знания специалиста о физической картине аварийных взрывов, так как понимание сценария развития аварии является основной составляющей при установлении причины взрыва.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ по аварийным взрывам газа в жилых многоквартирных домах показал тяжесть последствий данных ситуаций, что позволило сделать вывод о необходимости исследований в данной области и важности решаемой научной задачи по повышению уровня взрывобезопасности объектов жилого сектора.

2. Для определения и описания процесса формирования взрывоопасной концентрации газа в помещении проведены экспериментальные исследования. В результате было установлено, что коэффициент турбулентной диффузии, используемый при математическом описании процесса, значительно превышает коэффициент молекулярной диффузии и составляют величину не менее  $D = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ . Разработанная математическая модель с использованием полученного коэффициента турбулентной диффузии адекватно описывает распространение газа по помещению и может быть использована на этапе проектирования и отладки системы вентиляции, в том числе в рамках текущих проверок по контролю за состоянием системы жилого дома.

Предлагаемый в работе способ исключения возможности формирования взрывоопасной смеси предполагает комплексное решение, гарантирующее своевременное оповещение, перекрытие подачи газа и удаление газа, поступившего в объем помещения.

3. Проведенные модельные экспериментальные исследования позволили выявить ряд теоретических особенностей, характерных для физической картины внутреннего дефлаграционного взрыва. Установлено, что с точки зрения величины взрывных нагрузок сценарий внутреннего аварийного дефлаграционного взрыва в односвязной области не является самым неблагоприятным, так как по результатам экспериментальных исследований значительно большую опасность представляют внутренние взрывы в многосвязной (смежной) области.

Результаты исследований по воздействию на предохранительные конструкции взрывных нагрузок позволили сделать вывод о том, что использование данных конструкций позволит решить проблему взрывобезопасности жилых домов, с точки зрения снижения взрывных нагрузок до допустимого уровня;

4. Понимание физической картины аварийных взрывов является ключевой составляющей при реконструкции аварийной ситуации, связанной со взрывом бытового газа. В рамках четвертой главы данной работы полученные результаты были использованы при реконструкции сценария реальной аварийной ситуации, связанной со взрывом бытового газа.

**Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:**

1. Тимохин, В.В. Обеспечение взрывобезопасности жилых домов / В. В. Тимохин, А. А. Комаров, М. А. Грохотов, И. Р. Бегипшев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 3. – С. 69-74.

2. Тимохин, В.В. Особенности физической картины развития аварийных взрывов в изолированных помещениях / В.В. Тимохин// Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2022. – №2. – С. 60-66.

3. Тимохин, В.В. Экспериментальное исследование и моделирование процесса формирования взрывоопасных концентраций / А. А. Комаров, В. В. Тимохин // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 1. – С. 84-88.

4. Тимохин, В.В. Физическая картина развития аварийных взрывов в смежных помещениях жилых домов / А. А. Комаров, В. В. Тимохин, Ю. В. Тимохин // Безопасность жизнедеятельности. – 2023. – № 7(271). – С. 51-56.

5. Тимохин, В.В. Сравнительный анализ детонационного и дефлаграционного типов взрывного превращения на примере реальных аварийных ситуаций / А. А. Комаров, В. В. Тимохин, А. П. Шевченко, Р. Р. Шангараев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2024. – № 4. – С. 64-71.

**Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

6. Тимохин, В.В. Программа для оценки параметров формирования взрывоопасных концентраций в помещении / В.В. Тимохин, А.А. Комаров / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024610980 от 16.01.2024.

7. Тимохин, В. В. Программа для оценки состояния газовой среды помещения / В.В. Тимохин / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025613245 от 10.02.2025.

**Остальные публикации по теме диссертационной работы:**

8. Тимохин, В.В. Особенности взрывов бытового газа в жилых домах / В.В. Тимохин // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – 2021. – № 10. – С. 161-166.

9. Тимохин, В.В. Внутренние дефлаграционные взрывы в смежных помещениях жилых домов / В. В. Тимохин // Материалы международной научно-технической конференции "Системы безопасности". – 2021. – № 30. – С. 121-123.

10. Тимохин, В.В. Существующие мероприятия по обеспечению взрывобезопасности жилых домов / В.В. Тимохин // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции, посвященной проведению в Российской Федерации Года науки и технологий в 2021 году и 55-летию учебного заведения, Иваново, 10-11 ноября 2021

года. - Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «ИПСА ГПС МЧС России», 2021. - С. 191-194.

11. Тимохин, В.В. Причины и определяющие факторы формирования взрывных нагрузок при внутренних аварийных взрывах / В.В. Тимохин, М.А. Грохотов, Е.А. Комарова // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – 2022. – № 11. – С. 242-247.

12. Тимохин, В.В. Влияние характера остекления на физическую картину аварийного взрыва в жилых многоквартирных домах / М.А. Грохотов, В. В. Тимохин // Актуальные проблемы техносферной безопасности: Сборник тезисов научных трудов IV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных, преподавателей, приуроченная к 45-летию юбилею кафедры "Промышленная экология и техносферная безопасность", Ульяновск, 20–25 мая 2022 года / Отв. за выпуск Е.Н. Ерофеева. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2022. – С. 41-45.

13. Тимохин, В. В. Реконструкция аварийных взрывов / В. В. Тимохин // Материалы международной научно-технической конференции "Системы безопасности". – 2023. – № 32. – С. 287-293.

14. Тимохин, В.В. Экологические аспекты распространения примесей в жилых помещениях / В.В. Тимохин // Экологические проблемы XXI века: Материалы XV Научно-практической конференции слушателей и молодых ученых, Москва, 25 мая 2023 года / Сост. Т.Г. Грушева [и др.]. Под общей редакцией Т.Г. Грушевой. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы, 2023. – С. 76-79.

15. Тимохин, В.В. Восстановление сценария взрывной аварии на основе информации опубликованной в открытых источниках / Р.Р. Шангараев, А.А. Комаров, В.В. Тимохин // Академия Государственной противопожарной службы МЧС России: Теория. Инновации. Практика: Материалы научно-практической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня образования Академии ГПС МЧС России. В 5-ти частях, Москва, 19 октября 2023 года. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы, 2023. – С. 219-222.

16. Тимохин, В.В. Анализ последствий взрывной аварии в г. Махачкала с использованием методики М.А. Садовского / В. В. Тимохин, Р.Р. Шангараев // Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – 2024. – № 13. – С. 160-166.

Подписано в печать 02.04.2025. Формат 60×84<sup>1</sup>/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 105.

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