

На правах рукописи



Фадеев Виктор Евгеньевич

**ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА
ПОСРЕДСТВОМ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКРАННЫХ СТЕН В
ПАССАЖИРСКИХ ТЕРМИНАЛАХ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России на кафедре управления и экономики ГПС

Научный руководитель: Еремина Татьяна Юрьевна
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Гилетич Анатолий Николаевич,
доктор технических наук, старший
научный сотрудник,
ООО «Пожарная безопасность в
строительстве», заместитель
генерального директора по научной
деятельности

Пронин Денис Геннадиевич,
кандидат технических наук,
ФГБУ «ЦНИИП МИНСТРОЯ
России», начальник управления
технического регулирования

Ведущая организация: Всероссийский Ордена «Знак Почета»
научно-исследовательский институт
противопожарной обороны
МЧС России

Защита состоится «24» декабря 2019 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 205.002.02 на базе Академии Государственной противопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4.

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

<https://academygps.ru/upload/iblock/252/2523cdb805f015f1b4c39fc4f83816e1.pdf>

Автореферат разослан «25» октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сивенков Андрей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в России активно происходит строительство, модернизация, реконструкция пассажирских терминалов.

Проектируемые и строящиеся терминалы в наиболее крупных городах Российской Федерации (Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Пермь, Самара и др.) являются по своей сути уникальными объектами, как по принимаемым техническим решениям, предусматривающим совмещение в едином объеме помещений различных классов функциональной пожарной опасности с разнородным пребывающим контингентом и различными технологическими связями), так и по их государственной и социальной значимости, для проектирования которых отсутствуют единые типовые требования.



Рисунок 1 – Современные аэропорты в г. Ростов-на-Дону и в г. Сеуле

Пожары, происходящие на таких объектах, как в России, так и за рубежом, часто сопровождаются массовой гибелью, групповым травмированием людей, а также значительным материальным ущербом, поскольку пассажирские терминалы являются, по сути, многофункциональными объектами с массовым пребыванием людей.



Рисунок 2 – Пожары в аэропортах в г. Красноярске и в г. Киншас (Конго)

Подобное положение дел приводит к необходимости детальной оценки уровня пожарной безопасности зданий, а также принятию неукоснительных мер, направленных на безусловное обеспечение безопасности находящихся в них людей.

Актуальность данной темы очевидна, поскольку строительство новых пассажирских терминалов с массовым пребыванием людей, в составе которых находятся помещения разных классов функциональной пожарной опасности, требуют разработки и внедрения новых технических решений, направленных на обеспечение безопасности людей, а также предотвращение распространения опасных факторов пожара. Однако следует отметить, что до последнего времени требования к проектированию терминалов устанавливались в соответствии с их функциональной пожарной опасностью и, в целом, не учитывали характерных особенностей данных технически сложных объектов.

В настоящее время в международной практике для предотвращения распространения опасных факторов пожара допускается применение различных экранных конструкций, не имеющих аналогов на территории Российской Федерации. Подобное новое техническое решение способно разрешить многие проблемы, связанные не только с зонированием многофункциональных объектов транспортной инфраструктуры, в т.ч. пассажирских терминалов, но и обеспечением технологических связей, а также предотвращением распространения пожара. Реализация подобных решений позволит значительно снизить материальные затраты на строительство объектов и монтаж отдельных инженерных элементов, а также обеспечит минимизацию возможного ущерба в случае возникновения пожара. Кроме того, экранные конструкции не препятствуют свободному перемещению и эвакуации людей.

В данной связи совершенствование нормативных положений, а также технических решений для повышения уровня пожарной безопасности пассажирских терминалов приобретает еще большую актуальность и значимость.

Степень разработанности темы исследования. Существует большое количество исследований по изучению закономерностей динамики развития пожаров, а также выбору научно-обоснованных технических решений, направленных на предотвращение распространения опасных факторов пожара, но вопросы обеспечения пожарной безопасности пассажирских терминалов с учетом их специфических особенностей ранее в научных работах не рассматривались, а изучались только отдельные вопросы обеспечения безопасности.

Так, работы И.Р. Хасанова посвящены в основном исследованию огнестойкости и пожарной опасности строительных конструкций, А.В. Пехотикова – огнестойкости изгибаемых стальных конструкций, А.Н. Гилетича – методам определения тепловых воздействий на строительные конструкции при пожаре. А.В. Гомозов изучал граничные условия теплообмена для расчета огнестойкости плоских горизонтальных строительных конструкций в условиях пожара, В.И. Голованов внедрял вопросы прогнозирования огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой.

Особенно актуальным для пассажирских терминалов является разработка научно-обоснованных технических решений для предотвращения распространения опасных факторов пожара и расчетных методов, учитывающих закономерности динамики развития пожаров.

Учитывая изложенное, **целью исследования** является исследование пожарной опасности пассажирских терминалов и обеспечения предотвращения распространения пожара посредством применения экранных стен.

Для достижения данной цели в работе поставлены следующие **задачи исследования**:

1. Проанализировать противопожарное состояние наиболее крупных пассажирских терминалов в Российской Федерации для разработки методик, направленных на снижение пожарной опасности.

2. Разработать адаптированные и апробированные модели экспериментальной оценки огнестойкости экранных стен, а также математическую модель функциональной зависимости пределов огнестойкости от параметров экранных стен.

3. Определить пожарно-технические параметры материалов для заполнения и предлагаемую конструкцию экранной стены с учетом высокотемпературного воздействия.

4. Исследовать закономерности процессов распространения опасных факторов пожара при применении экранных стен и установить функциональную зависимость их пожарно-технических характеристик от высокотемпературного воздействия.

5. Разработать предложения по установлению параметров экранных стен, а также рекомендации по применению экранных стен в пассажирских терминалах, обеспечивающих предотвращение распространения пожара.

Объектом исследования является параметры экранных стен при высокотемпературном воздействии.

Предмет исследования – обеспечение предотвращения распространения опасных факторов пожара за счет применения экранных стен.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– определены новые закономерности поведения конструктивных элементов экранных стен в условиях высокотемпературного воздействия;

– установлены научные подходы к определению технических параметров экранных стен, обеспечивших предотвращение распространения пожара;

– впервые предложены расчетно-экспериментальные методы определения предела огнестойкости экранных стен и установлена функциональная зависимость их фактического предела огнестойкости в зависимости от толщины внешней обшивки, а также геометрических параметров экрана от требуемого предела огнестойкости.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в:

1. Разработке технических решений по конструкции и материалам заполнения экранных стен.
2. Установлении функциональной зависимости пожарно-технических характеристик экранных стен от высокотемпературного воздействия.
3. Подготовке предложений по внесению изменений в Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», межгосударственные стандарты, национальные стандарты и своды правил в части применения экранных стен.

Результаты работы позволяют разрабатывать эффективные противопожарные мероприятия, направленные на предотвращение распространения опасных факторов пожара в зданиях общественного назначения с массовым пребыванием людей.

Методология и методы исследования.

Основу теоретических исследований составляли методы математического моделирования и физического подобия, физический эксперимент, теория ошибок, сравнение, описание. Результаты численных расчетов подтверждены результатами экспериментальных исследований.

Численное моделирование прогрева рассматриваемых строительных конструкций в условиях пожара производилось при помощи вычислительного комплекса Ansys Mechanical, позволяющего провести теплотехнический расчет конструкции на основе ее программной модели.

При этом, основу экспериментальных исследований составляли: классическая теория тепломассообмена при пожаре; адаптированные методики определения теплового излучения; испытания на огнестойкость, основанные как на предполагаемой области применения экранных стен, так и на разработанной конструктивной схеме и ожидаемых пожарно-технических характеристиках.

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве в изданиях, рекомендованных ВАК, все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично.

На защиту выносятся:

1. Адаптированные и апробированные модели экспериментальной оценки огнестойкости экранных стен, а также математическая модель ее функциональной зависимости.
2. Результаты исследований пожарно-технических характеристик материалов для заполнения и предлагаемой конструкции экранной стены.
3. Результаты функциональной зависимости, позволяющей определять фактический предел огнестойкости в зависимости от толщины внешней обшивки, а также геометрические параметры экрана – от требуемого предела огнестойкости.
4. Предложения по установлению параметров экранных стен, а также рекомендации по применению экранных стен в пассажирских терминалах, обеспечивающих предотвращение распространения пожара.

Практическая значимость работы подтверждена использованием результатов исследования при разработке:

– Федерального закона от 29 июля 2017 г. № 244-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»;

– проекта межгосударственного стандарта ГОСТ EN 15254-6 «Расширенное применение результатов испытания на огнестойкость. Несущие стены. Экранные стены»;

– Методических рекомендаций по определению критической величины теплового излучения для материала (заполнения) экранной стены для курсантов и слушателей Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России;

– нормативных документов по пожарной безопасности.

Степень достоверности и апробации результатов обеспечивались:

– апробированными экспериментальными методами определения прочностных и теплофизических характеристик и оценки огнестойкости строительных конструкций;

– использованием в экспериментальных исследованиях поверенных измерительных приборов и аппаратуры, обеспечивающих достаточную точность измерения;

– использованием валидированных и верифицированных программных комплексов;

– внутренней непротиворечивостью результатов и их согласованностью с результатами экспериментов.

Основные результаты работы были представлены и получили одобрение на 7 международных научно-практических конференциях:

VI Международная научно-практическая конференция «Сервис безопасности в России: Опыт, проблемы, перспективы» (г. Санкт-Петербург, 2014);

XXVII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности» (г. Москва, ВНИИПО МЧС России, 2015);

Практическая конференция «Актуальные проблемы системы обеспечения пожарной безопасности» в рамках 22 Международной выставки технических средств охраны и оборудования для обеспечения безопасности и противопожарной защиты «MIPS/Securika» (г. Москва, 2016);

XXVIII Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы пожарной безопасности» (г. Москва, ВНИИПО МЧС России, 2016);

XXIX Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России (г. Москва, ВНИИПО МЧС России, 2017);

Международная конференция «Система обеспечения пожарной безопасности. Состояние, тенденции, пути развития» (г. Санкт-Петербург,

Военный институт (инженерно-технический) Военной Академии материально-технического обеспечения, 2017);

XX Международная межвузовская научно-практическая конференция студентов, магистратов, аспирантов и молодых ученых. (г. Москва, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 научных статей, из них 11 – размещены в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК для публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, списка использованной литературы и приложения. Содержание работы изложено на 109 страницах текста, включает в себя 13 таблиц, 42 рисунка, список литературы из 118 наименований, а также приложение на 40 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы научно-квалификационной работы и степень ее разработанности, сформулированы цель, задачи, проанализированы объект и предмет исследования, показана научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, представлены методология и методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту, а также степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе проведен анализ противопожарного состояния пассажирских терминалов в десяти наиболее крупных городах Российской Федерации (Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Пермь, Самара и др.) и раскрываются их характерные особенности, а также обозначены основные проблемные вопросы, в части обеспечения их пожарной безопасности.

В настоящее время активно ведутся процессы строительства, модернизации, реконструкции российских пассажирских терминалов. Проектируемые и строящиеся терминалы являются по своей сути уникальными объектами, для проектирования которых отсутствуют (и даже не могут быть предусмотрены) единые типовые требования.

Для примера в работе рассмотрены наиболее характерные варианты пассажирских терминалов с массовым пребыванием людей: аэровокзалы, аэропорты и т.п.

Как показывает проведенный анализ пожаров, произошедших за последние 20 лет, существует тенденция к снижению уровня пожарной безопасности зданий пассажирских терминалов, как в России, так и за рубежом. Причем, такие пожары зачастую сопровождаются массовой гибелью, групповым травмированием людей, а также значительным материальным ущербом (таблица 1).

Таблица 1 – Информация по пожарам в зданиях терминалов

№ п/п	Дата	Страна, аэропорт	Краткое описание
1	2	3	4
1.	15.04.2000	Демократическая Республика Конго, аэропорт «Киншас»	При пожаре погибло более 100 человек и более 200 ранены.
2.	05.05.2004	Россия, аэропорт в Усть-Янском улусе (районе) Якутии	Вследствие короткого замыкания электропроводки в мастерской на первом этаже здание выгорело полностью.
3.	29.10.2005	Нидерланды, Амстердам, аэропорт «Схипхол»	Пожар в изоляторе внутреннего содержания полиции аэропорта. Огонь распространился по всему корпусу, в результате 11 погибших и 15 раненых.
4.	05.05.2006	Бельгия, аэропорт «Завентем» (Брюссель)	При пожаре в здании аэропорта пострадали 6 человек, ущерб – более 10 миллионов евро.
5.	02.03.2009	Россия, аэропорт поселка Корф Олюторского района Камчатского края	Пожар уничтожил около 30% одноэтажного здания аэровокзала. Причина возгорания – короткое замыкание на временной линии электропередачи.
6.	03.03.2009	Россия, аэропорт ФГУП «Чукот-авиа»	Пожар по причине нарушения требований пожарной безопасности при эксплуатации бытовых электроприборов повлек гибель 1 человека и материальный ущерб более 21 млн. рублей.
7.	19.12.2011	Россия, аэропорт Черемшанка под г. Красноярском	Полностью уничтожено здание аэровокзала. Возгорание из-за короткого замыкания на крыше. Общая площадь пожара составила 3 тыс. кв. м.
8.	07.07.2013	Россия, аэропорт Козьмодемьянск (Красноярский край)	Двухэтажное здание аэропорта полностью уничтожено пожаром.
9.	19.06.2015	Россия, аэропорт Толмачево в Новосибирске	Причина пожара – короткое замыкание электропроводки. Пожар на фасаде здания терминала внутренних авиалиний. В результате пожара эвакуированы более 500 человек.
10.	26.01.2018	Таиланд, аэропорт северо-восточной провинции Кхонкэн	Возгорание началось на третьем этаже терминала аэропорта из-за вышедшего из строя электрощита. Порядка тысячи пассажиров эвакуированы из здания. Огонь уничтожил до 40% кровли объекта.

В целях установления основных характерных нарушений требований пожарной безопасности в зданиях аэропортов проведен анализ обеспечения пожарной безопасности на территории 10 наиболее крупных объектов на территории Российской Федерации. В ходе проведенной работы установлено, что основными типовыми нарушениями действующих нормативных

документов являются: отсутствие либо неисправность систем противопожарной защиты; занижение пределов огнестойкости отдельных элементов и конструкций; нарушение требований, предъявляемых к устройству и параметрам эвакуационных путей и выходов и т.д.

В ходе проведенного анализа установлено, что одной из главных причин возникновения проблемных вопросов в части обеспечения пожарной безопасности является несовершенство существующих нормативных положений, а также отсутствие системного подхода к проектированию и строительству подобных технически сложных объектов защиты.

Кроме того, изучен международный опыт применения экранных стен, а также отечественные научные исследования по изучению различных методов предотвращения распространения пожара.

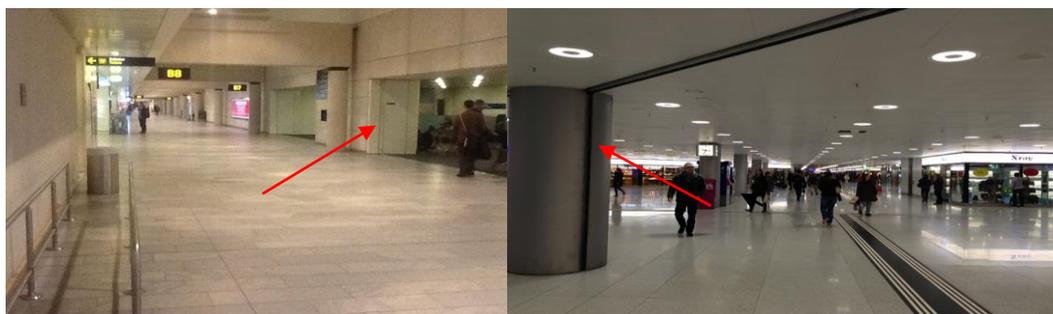


Рисунок 3 – Примеры устройства экранных стен

Выполненный аналитический обзор позволил выявить наиболее важные проблемы предотвращения распространения опасных факторов пожара в пассажирских терминалах, а также установить эффективность применения альтернативных технических решений, в том числе экранных стен. В частности, по результатам анализа:

выявлена необходимость изучения закономерностей проявления опасных факторов пожара с учетом специфики объектов защиты (многофункциональность, значительные открытые площади, массовое скопление людей), а также технологических особенностей;

нормативные правовые акты и нормативные документы по пожарной безопасности не содержат актуальных требований пожарной безопасности к пассажирским терминалам и требуется переработка всех нормативных положений в части их приведения в соответствие с передовыми достижениями науки и техники, в том числе по внедрению новых технических решений, направленных на предотвращение распространения опасных факторов пожара;

установлено, что для зданий пассажирских терминалов необходимо проводить исследования, направленные на установление научно обоснованных требований к новым видам противопожарных преград (экраным стенам), способным эффективно обеспечить ограничение распространения пожара;

научно обоснованные требования к экранным стенам должны основываться на расчетных методах, учитывающих закономерности динамики развития пожаров.

Во второй главе проведен выбор методов исследования (расчетных и экспериментальных), подтверждающих эффективность применения экранных стен для предотвращения распространения пожара.

Основой экспериментальных исследований послужили классическая теория тепломассообмена при пожаре, адаптированные методики определения теплового излучения, а также испытания на огнестойкость с учетом предполагаемой области применения экранных стен, а также разработанной конструктивной схемы и ожидаемых пожарно-технических характеристик.

В качестве метода исследования для определения пожарно-технических характеристик материала экранных стен рассмотрена возможность применения апробированного метода определения теплового излучения падающего теплового потока. Указанный метод разработан на основании анализа причин распространения пожара между объектами защиты и учитывает наличие лучистого теплообмена.

В основу метода положена классическая теория теплообмена излучением. Сущность задачи сводится к сопоставлению реальной (падающей) плотности теплового потока для облучаемого объекта $q_{\text{пад}}$ с максимально допустимой $q_{\text{доп}}$.

Условие безопасности выполняется, если:

$$q_{\text{пад}} \leq q_{\text{доп}} \quad (1)$$

В данном случае допускаемая интенсивность облучения является экспериментальной величиной.

Схема стенда для определения коэффициентов отражательной, поглощательной и пропускающей способности представлена на рисунке 4.

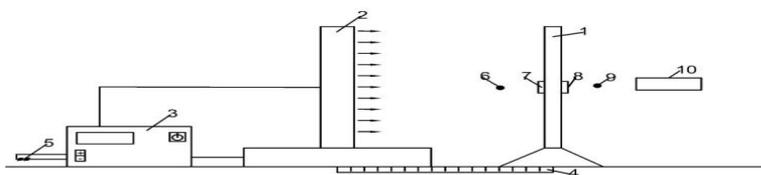


Рисунок 4 – Схема стенда: 1 – образец материала; 2 – радиационная панель; 3 – блок управления; 4 – линейка для определения расстояния от панели до образца; 5 – источник питания электроэнергией; 6 – термопара 1; 7 – термопара 2; 8 – термопара 3; 9 – термопара 4; 10 – приемник теплового потока

Определение пределов огнестойкости образца экранной стены осуществлялось по методу испытаний на огнестойкость в соответствии с ГОСТ 30247.1-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции».

Основанием для выбора данного метода послужила его область применения, устанавливающего методы испытания на огнестойкость для несущих, самонесущих и навесных стен и перегородок, что позволяет распространить его результаты для аналогичных конструкций экранных стен.

В целях реализации обозначенной задачи по определению предельного состояния предлагаемой экранной стены по признаку потери теплоизолирующей способности разработан опытный образец размером в плане $B \times H = 3000 \times 3000$ мм, представляющий собой многослойную конструкцию, состоящую из каркаса и теплоизолирующей обшивки (рисунок 5)

Одинарный стальной тонкостенный каркас из оцинкованных профилей изготовлен из стоечных профилей ПС 75/50 и направляющих профилей ПН 75/40. Толщина стенок профилей всех типов составляет 0,6 мм. В качестве теплоизолирующей обшивки с обогреваемой стороны конструкции установлены панели габаритными размерами $B \times H = 1000 \times 1000$ мм, массой 8,5 – 9,3 кг, толщиной около 30 мм. Каждая из панелей состоит из двух слоев фольгированного базальтового волокна МБОР-5Ф, склеенных между собой (не фольгированными сторонами) огнезащитным составом ОВПФ-1М. Расход огнезащитного состава: 8,0-8,7 кг/м².



Рисунок 5 – Фрагмент конструкции с заполнением материалом образца

Оценка предела огнестойкости экранной конструкции предусматривается путем решения теплотехнической задачи прогрева строительных конструкций в условиях нестационарного теплового воздействия при стандартном режиме пожара.

При расчете теплового состояния произвольных конструкций решается задача нахождения нестационарного поля температур в заранее известной области. Опытные данные по испытаниям конструкций, аналогичных рассматриваемым, позволяют определить предел огнестойкости без проведения огневых испытаний. В данном случае используется численный подход решения задачи.

В качестве метода решения используется метод конечных элементов (далее – МКЭ). В основе метода положен принцип деления исследуемой области на совокупность подобластей с заданными теплофизическими характеристиками.

Численное моделирование прогрева рассматриваемых строительных конструкций в условиях пожара предусматривается при помощи вычислительного комплекса Ansys Mechanical, позволяющего провести теплотехнический расчет конструкции на основе ее программной модели.

В математическое описание нагрева произвольных конструкций входит дифференциальное уравнение, описывающее распространение тепла в твердом теле с известными теплофизическими свойствами, а также начальные и граничные условия.

Условия однозначности для решения дифференциального уравнения теплопроводности численными методами включают:

1. Геометрические свойства системы.

Конструкция экрана представляет собой совокупность трех слоев изотропных материалов, непосредственно соприкасающихся друг с другом. Геометрическая модель системы, ввиду изотропности входящих в ее состав материалов, принята в виде фрагмента, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда с размерами 0,1x0,1 м, различной толщины, в зависимости от исследуемого типа конструкции экрана (рисунки 6-7).

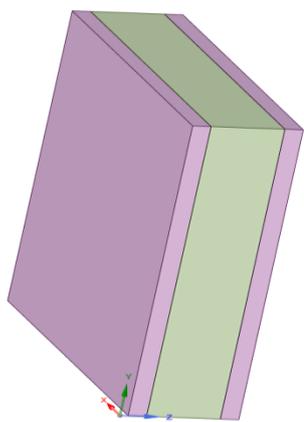


Рисунок 6 – Фрагмент исследуемого экрана (геометрическая модель)

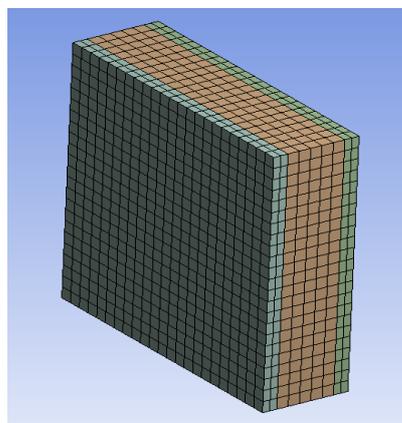


Рисунок 7 – Фрагмент исследуемого экрана (конечно-элементная модель)

2. Граничные условия, учитывающие взаимодействие с окружающей средой.

Используются граничные условия 3-го рода, представляющие собой закон изменения температуры окружающей среды и закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Для условий пожара в качестве закона изменения температуры окружающей среды принимается «стандартный» режим пожара по ГОСТ 30247.0-94.

Изменение коэффициента теплоотдачи системы «огневая камера» – «поверхность экрана» задается зависимостью:

$$\alpha = 29 + 5,77 \varepsilon_{red} \frac{\left(\frac{T_B}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0}{100}\right)^4}{T_B - T_0}, \quad (2)$$

Ввиду отсутствия достоверных данных о температурных зависимостях коэффициента теплопроводности и теплоемкости материалов конструкции, необходимых для численного решения задачи прогрева конструкции при пожаре, требуются дополнительные исследования для определения указанных теплофизических характеристик.

По результатам анализа действующих нормативных положений в области пожарной безопасности были определены наиболее оптимальные и достоверные методики, позволяющие установить пожарно-технические характеристики материала и конструкций экранных стен.

В рамках проведенного анализа установлено, что предложенные методики позволят осуществить выбор материалов и конструкций экранных стен, а также достоверно определить их пожарно-технические параметры, в том числе с применением расчетных методов.

В третьей главе проведены экспериментальные исследования пожарно-технических характеристик экранных стен.

Исследование температурного режима и критических величин падающего теплового потока при применении экранных стен основывалось на определении коэффициентов отражательной, поглощательной и пропускающей способности представленного образца.

Для определения коэффициентов отражательной, поглощательной и пропускающей способности образца проведена серия экспериментов, в ходе которой предложен экспериментальный стенд для определения обозначенных коэффициентов (рисунок 4).

Испытания проведены для 9 образцов размером 20x20 см, толщиной 1,5 см. Заполнение образца специальным теплоизоляционным материалом составляет около 85 – 90 %.

В таблице 2 представлены результаты экспериментальных исследований значения критической плотности падающего лучистого теплового потока для различных параметров образца. Величина критической плотности зависит от времени воздействия на материал.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований теплового потока

№ п/п	Заполнение материалом образца (плита из специального теплоизоляционного материала толщиной 15±1 мм с покрытием ОВПФ-1М)	Среднее значение $q_{кр}$, кВт/м ² , при продолжительности облучения, мин					
		5	10	15	20	25	30
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1 мм	4,0	4,5	4,7	6,0	8,8	10,1
2	2 мм	3,2	3,6	3,9	5,0	7,6	9,0
3	3 мм	2,1	2,6	2,9	3,8	6,5	8,0

В результате эксперимента установлено, что при применении предлагаемого материала падающий тепловой поток не наносит повреждения испытываемому образцу, состояние его обогреваемой поверхности при этом не изменяется. Следовательно, предлагаемый материал обеспечивает требуемые пожарно-технические характеристики и может быть рекомендован для применения в составе экранных стен.

Вместе с тем, для оценки поведения экранной стены в целом целесообразно разработать соответствующую конструктивную схему и оценить ее в рамках крупномасштабных испытаний.

Исследование основных пожарно-технических характеристик экранных стен и закономерностей их поведения в условиях огневого воздействия осуществлялось на основании испытаний экранных стен с учетом предполагаемой области их применения, а также предлагаемой конструктивной схемы в соответствии с ГОСТ 30247.1-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования».

В процессе испытания образец устанавливался на проем кирпичной стены толщиной 250 мм. Огневое воздействие на образец производилось со стороны теплоизолирующей обшивки.

Избыточное давление в огневой камере печи, в верхнем уровне образцов, через 5 мин от начала испытаний и до их окончания составляло (10 ± 2) Па.

В ходе испытания (рисунки 8 и 9) установлено, что первое повышение температуры на необогреваемой поверхности в сравнении с температурой конструкции до испытания более чем на 180°C зафиксировано на 31 минуте на левой нижней огнезащитной панели (до 195°C).

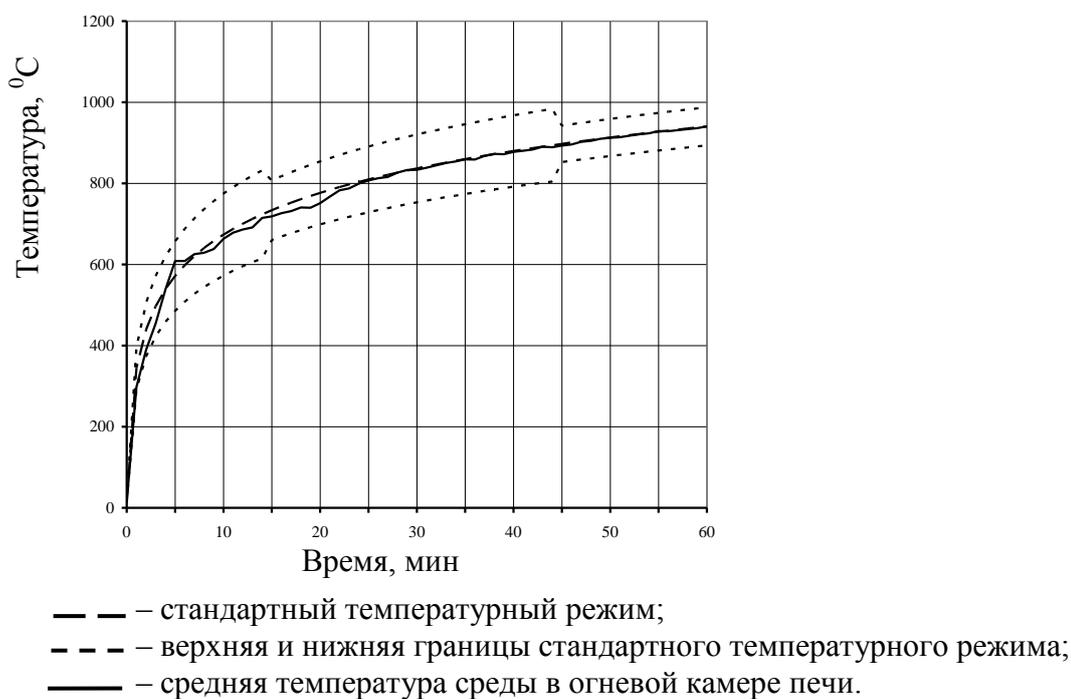


Рисунок 8 – Изменение температуры в огневой камере печи



Рисунок 9 – Образец после прекращения испытания

В рамках проведенных испытаний установлено, что предлагаемая конструктивная схема экранной стены обеспечивает фактический предел огнестойкости не менее EI 30.

В целях исключения избыточных материальных затрат на проведение крупномасштабных испытаний при изменении геометрических параметров экранных стен целесообразно определить соответствующую функциональную зависимость, позволяющую оценивать предел огнестойкости расчетными методами.

Исследование закономерностей теплофизических характеристик от конструктивного решения экранной стены соответствует решению обратной задачи теплопроводности, при решении которой устанавливаются такие значения теплопроводности и теплоемкости материала, при которых результаты численного расчета совпадают с результатами прогрева, полученными при лабораторных испытаниях образцов.

По результатам исследований, проведенных лабораторными методами, получены температурные зависимости коэффициента теплопроводности и теплоемкости локальных объемов материалов, учитывающие их влагосодержание.

На основании разработанной программной модели конструкции экрана с использованием полученных температурных зависимостей теплофизических параметров материалов проводится оценка предела огнестойкости конструкции экрана с использованием выбранного метода численного моделирования.

Для целей достоверности результатов численных расчетов проводится верификация разработанной программной модели на основе данных об огневых испытаниях аналогичной конструкции. Верификация исходной модели проводится на основе достижения совпадения результатов

численного расчета с результатами огневых испытаний аналогичной конструкции.

Условия численного моделирования принимались аналогичными с условиями проведённых огневых испытаний. На рисунке 10 приведены результаты численного расчета прогрева конструкции экрана использованной при проведении огневых испытаний.

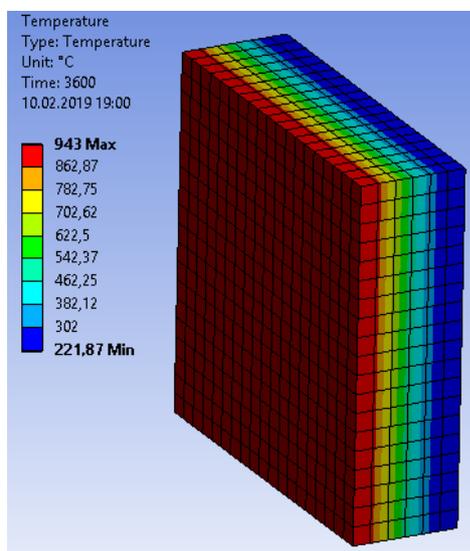


Рисунок 10 – Поля температур в сечении исследуемого экрана на момент времени прогрева 60 минут

Результаты верификации позволяют сделать следующие выводы: определенные в ходе решения обратной задачи эффективные значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости обеспечивают удовлетворительную сходимость результатов численного расчета и результатов огневых испытаний, в том числе и для крупномасштабных испытаний;

разработанная программная модель может быть использована для дальнейших исследований огнестойкости экрана с его различными геометрическими параметрами;

дальнейшие исследования огнестойкости экрана могут проводиться для различных значений толщины его наружных слоев (МБОР 5ф, 8ф, 10ф, 13ф, 16ф) с целью построения обобщенной зависимости для возможности последующего аналитического расчета огнестойкости экрана с любыми промежуточными значениями толщины наружных слоёв защитного материала.

Обобщенные результаты расчета пределов огнестойкости экранных стен различной конструкции приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета пределов огнестойкости экранных стен различной конструкции (МБОР 5ф, 8ф, 10ф, 13ф, 16ф)

№ п/п	Внешний слой панелей	Толщина внешнего слоя, мм	Внутренний слой панелей, мм	Толщина внутреннего слоя, мм	Предел огнестойкости*	Обозначение предела огнестойкости
1	МБОР 5ф	2x5	ОВПФ-1М (ТУ 1523-025-47935838-2003). Расход огнезащитного состава 8,0-8,7 кг/м ²	20	EI 55	EI 45
2	МБОР 8ф	2x8	ОВПФ-1М (ТУ 1523-025-47935838-2003). Расход огнезащитного состава 8,0-8,7 кг/м ²	20	EI 73	EI 60
3	МБОР 10ф	2x10	ОВПФ-1М (ТУ 1523-025-47935838-2003). Расход огнезащитного состава 8,0-8,7 кг/м ²	20	EI 87	EI 60
4	МБОР 13ф	2x13	ОВПФ-1М (ТУ 1523-025-47935838-2003). Расход огнезащитного состава 8,0-8,7 кг/м ²	20	EI 109	EI 90
5	МБОР 16ф	2x16	ОВПФ-1М (ТУ 1523-025-47935838-2003). Расход огнезащитного состава 8,0-8,7 кг/м ²	20	EI 133	EI 120

* - установлено на основании численного расчета с учетом результатов огневых испытаний, которые показали, что предельное состояние по потере целостности наступает не ранее потери теплоизолирующей способности

Время достижения критической температуры на необогреваемой поверхности конструкции в зависимости от толщины одного листа внешней обшивки представлено на рисунке 11.

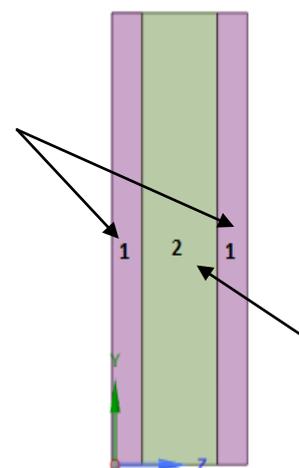
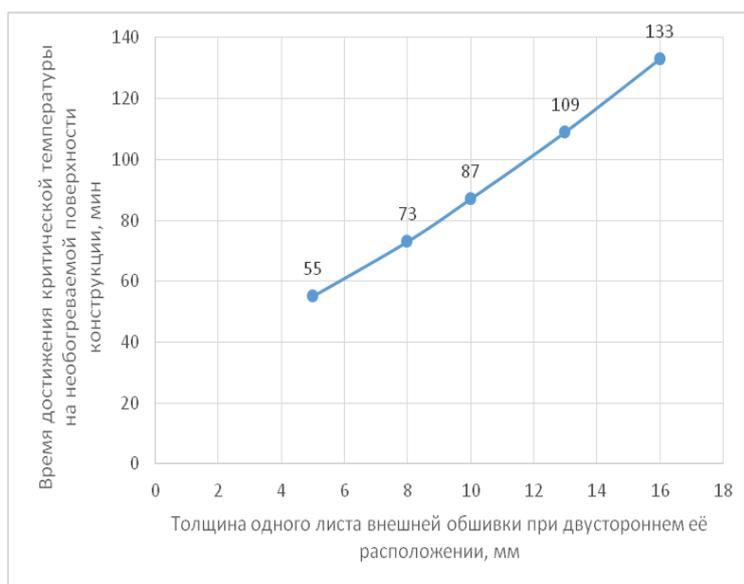


Рисунок 11 – Время достижения критической температуры на необогреваемой поверхности конструкции в зависимости от толщины листа внешней обшивки (1) при двустороннем ее расположении и средним слоем из огнезащитного состава ОВПФ-1М (2)

Полученные результаты расчета предела огнестойкости экрана различной конструкции позволяют выявить функциональную зависимость между толщиной наружных обшивок из материала МБОР и пределом огнестойкости защитного экрана.

Определение функциональной зависимости проводится методом регрессионного анализа полученных в результате численного расчета данных.

Уравнение множественной регрессии может быть представлено в виде:

$$Y = f(\beta, X) + \varepsilon, \quad (3)$$

где $X = X(X_1, X_2, \dots, X_m)$ – вектор независимых (объясняющих) переменных; β – вектор параметров (подлежащих определению); ε – случайная ошибка (отклонение); Y – зависимая (объясняемая) переменная.

Теоретическое линейное уравнение множественной регрессии имеет вид:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon, \quad (4)$$

β_0 – свободный член, определяющий значение Y , в случае, когда все объясняющие переменные X_j равны 0.

По результатам проведенных исследований установлено, что уравнение регрессии (оценка уравнения регрессии) имеет следующий вид:

$$Y = 17.3497 + 7.1202X_1. \quad (5)$$

В рамках данной главы экспериментальными и расчетными методами обоснован новый тип противопожарной преграды – экранной стены, для определения условий применения которой на объектах с массовым пребыванием людей:

осуществлен выбор допустимых методов испытаний, подтверждающих как требуемую область применения экранных стен, так и фактические пожарно-технические характеристики конструкций и материалов заполнения;

предложены материалы для заполнения экранных стен и проведены испытания по методу определения теплового излучения падающего теплового потока, подтверждающие, что критические плотности падающего теплового потока не достигаются;

осуществлен выбор конструктивной схемы экранных стен, а также проведены испытания на огнестойкость, подтверждающие обеспечение предлагаемой конструкцией требуемого предела огнестойкости не менее EI 30;

получена функциональная зависимость, позволяющая определять фактический предел огнестойкости в зависимости от толщины листов внешней обшивки, а также геометрические параметры защитного экрана в зависимости от требуемого предела огнестойкости.

По результатам проведенной работы можно сделать вывод, что предлагаемая конструкция экранной стены позволит обеспечить требуемый уровень обеспечения пожарной безопасности объектов защиты при минимизации финансовых затрат путем внедрения новых решений,

соответствующих последним достижениям науки и техники в области пожарной безопасности.

Кроме того, в целях исключения необходимости проведения крупномасштабных дорогостоящих испытаний экранных стен целесообразно проведение гармонизации существующего европейского стандарта по расширенному применению результатов испытания на огнестойкость, внедрение которого позволит реализовать наиболее эффективные варианты противопожарной защиты с учетом оптимизации материальных затрат на обеспечение пожарной безопасности.

Четвертая глава посвящена разработке рекомендаций по снижению распространения опасных факторов пожара за счет применения экранных стен.

В настоящее время Федеральным законом от 29 июля 2017 года № 244-ФЗ внесены отдельные изменения в Технический регламент о требованиях пожарной безопасности, позволяющие реализовать возможность выбора новых технических решений, в части устройства экранных стен, являющихся в ряде случаев наиболее оптимальным и обоснованным вариантом противопожарной защиты.

В целях установления требований пожарной безопасности к указанным конструкциям, в том числе учитывающих их область, требуемые пожарно-технические характеристики, методы испытания, проведен анализ и представлены предложения по дальнейшему совершенствованию нормативных положений (таблица 4).

Таблица 4 – Предложения по конструкции и элементам экранных стен

№ п/п	Классификационный параметр	Типы вертикальных мембран		Примечание
		Теоретические (по методам испытаний)	Практические	
1	2	3	4	5
1.	Конструктивное исполнение	жесткая конструкция		в зависимости от функции экрана
		гибкая конструкция		
2.	Функция экрана	элемент противопожарной преграды		по ГОСТ 30247.1 – для конструкций и по ГОСТ Р 53307 – заполнение проемов
		заполнение проема в противопожарной преграде		
		комбинация		
		горизонтально		
3.	Предел огнестойкости	комбинация		по 123-ФЗ (нормативные требования к конструкциям (заполнению) и ГОСТ 30247.0 (применяемые при испытаниях))
		360	-	
		240	-	
		180	150	
		90	-	
		60	60	
		45	45	
30	30			
	15	15		

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5
4.	Расположение в рамной конструкции	вертикально		в зависимости от расположения
		горизонтально		
		комбинация		
5.	Характерные признаки предельных состояний	потеря целостности (E)		по 123-ФЗ (нормативные требования к конструкциям (заполнению) и ГОСТ 30247.0, ГОСТ Р 53307 и ГОСТ Р 53308 (применяемые при испытаниях)
		потеря целостности и теплоизолирующей способности (EI)		
		EIW (с учетом достижения предельной величины плотности теплового потока)		
		-	EIS (с учетом достижение предельной величины дымогазоне-проницаемости); EIWS	
6.	Наличие заполнений	отсутствуют (сплошные)		по ГОСТ Р 53307, ГОСТ 53308
		имеются		
7.	Наличие орошения	-	с орошением АУПТ	апробированные решения советов МЧС России
		-	без орошения АУПТ	
8.	Возможность перемещения	стационарные		по ГОСТ 30247.1 и ГОСТ Р 53307
		мобильные		
9.	Виды приводов для мобильных экранов	ручной		в зависимости от функции экрана
		автоматический		
		дистанционный		
		комбинированный		
10.	Элементы примыкания экранных стен	примыкающие		в зависимости от функции экрана
		-	выступающие за габариты проема	
		-	перемещающиеся внутрь преграды	
13.	Расположение элементов крепления экранных стен	горизонтально		в зависимости от функции экрана
		к потолку	к полу	
		вертикально		
14.	Наличие направляющих	-	без направляющих	в зависимости от функции экрана
		-	с боковыми направляющими	

В ходе диссертационного исследования установлено, что для последующего применения экранных стен в рамках действующего законодательства требуются гармонизация отечественных требований с международными нормами, а также актуализация действующих отечественных нормативных документов.

В рамках работы предложен перечень первоочередных нормативных документов, подлежащих гармонизации и актуализации, а также разработаны предложения по внесению изменений в действующие нормативные правовые акты и нормативные документы по пожарной безопасности. Данные

предложения касаются актуализации методов испытания на огнестойкость с учетом предлагаемого конструктивного исполнения экранных стен, выполняемых ими функций, а также особенностей их устройства (возможности их автоматического перемещения в объеме либо вне объема ограждающих конструкций, использования экранных стен в виде противопожарных преград либо их заполнения и т.д.).

Кроме того, представлены предложения по нормированию пределов огнестойкости, а также по установлению понятия «экранная стена»:

«Экранная стена – самонесущая строительная конструкция или заполнение проема в такой конструкции с нормированным пределом огнестойкости, предназначенные для предотвращения распространения пожара».

Впервые подготовлена первая редакция межгосударственного стандарта, устанавливающего возможность расширенного применения – ожидаемого поведения ограждающей конструкции и ее элементов при воздействии пламени, которое может основываться на интерполяции и экстраполяции данных, полученных в ходе соответствующих испытаний.

Утверждение в установленном порядке обозначенных предложений позволит обеспечить повышение уровня пожарной безопасности зданий пассажирских терминалов путем применения новых технических решений (экранных стен), обеспечивающих предотвращение распространения пожара.

Кроме того, разработка экранных конструкций отечественного производства позволит реализовать позицию Российской Федерации, в части эффективного импортозамещения, а также позволит реализовать систему более гибкого нормирования за счет применение новых вариантов противопожарной защиты, адаптированных к существующим реалиям, основанных на научных исследованиях, позволяющих обеспечить требуемый уровень пожарной безопасности при минимизации финансовых затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании проведенного анализа действующих требований пожарной безопасности, в том числе применяемых в мировой практике, а также противопожарного состояния наиболее крупных пассажирских терминалов в Российской Федерации, выявленных особенностей возникновения и развития пожаров в зданиях пассажирских терминалов научно обоснованы подходы по обеспечению противопожарной защиты подобных многофункциональных, технически сложных объектов с массовым пребыванием людей путем устройства экранных стен.

2. Разработаны адаптированные и апробированные модели экспериментальной оценки огнестойкости экранных стен. По результатам проведенной серии экспериментов огнестойкости предложенной конструкции установлено, что повышение температуры на ее необогреваемой поверхности в сравнении с температурой конструкции до испытания более чем на 180 °С (195 °С) наступает не ранее 31 мин. При этом,

минимальный фактический предел огнестойкости указанной конструкции составляет не менее EI 30. Значения критической плотности падающего лучистого теплового потока для различных параметров образца (плита из специального теплоизоляционного материала толщиной 15 ± 1 мм с покрытием ОВПФ-1М) при продолжительности облучения до 30 мин не превышает $8,0 - 10,1$ кВт/м².

3. Установлена новая функциональная зависимость в виде уравнения множественной регрессии, позволяющая определять фактические пределы огнестойкости экранных стен, обеспечивающих предотвращение распространения пожара, а также их геометрические параметры без проведения крупномасштабных огневых испытаний.

4. Получена удовлетворительная сходимость результатов численного моделирования процесса прогрева исследуемых конструкций экранных стен с аналогичными результатами, полученными при выполнении крупномасштабных огневых испытаний (максимальное расхождение одноименных величин не превышает 15 %), подтвержден вывод о возможности использования полученных эмпирических зависимостей для определения фактических пределов огнестойкости экранных стен в зависимости от их геометрических параметров.

5. По результатам экспериментальных исследований были установлены требования к конструкции экранных стен, области их применения, с учетом выполняемых функций, размещения, обеспечения требуемых пределов огнестойкости, наличия заполнения и орошения, а также возможности их перемещения. Научно обоснована конструктивная схема экранных стен, обеспечивающая предотвращение распространения пожара, а также предложены материалы для заполнения экранных стен.

6. Разработаны предложения по актуализации нормативных правовых актов и нормативных документов по пожарной безопасности в сфере применения экранных стен для объектов строительства, в том числе проект изменений в Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», проект межгосударственного стандарта «Расширенное применение результатов испытания на огнестойкость. Ненесущие стены. Экранные стены».

Основные результаты работы опубликованы в следующих ведущих периодических изданиях из перечня ВАК:

1. Фадеев В.Е. Гармонизация российских и международных нормативных документов по испытаниям на огнестойкость строительных материалов и изделий [Электронный ресурс] / Фадеев В.Е., Еремина Т.Ю. // Технологии техносферной безопасности. — 2014. — № 6(58). — Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-6/34-06-14.ttb.pdf>.

2. Фадеев В.Е. Некоторые вопросы обеспечения пожарной безопасности зданий аэропортов [Текст] / Фадеев В.Е., Еремина Т.Ю. // Пожарная безопасность. — 2015. — № 2. — С. 144-151.

3. Фадеев В.Е. Совершенствование современных методов испытаний на огнестойкость на основе внедрения гармонизированных европейских стандартов [Электронный ресурс] / Фадеев В.Е., Бушнев В.Г. // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России». – 2016. – № 3 — Режим доступа: <https://vestnik.igps.ru/wp-content/uploads/V83/3.pdf>.

4. Фадеев В.Е. К оценке возможности внедрения экранных стен на объектах с массовым пребыванием людей [Текст] / Фадеев В.Е., Еремина Т.Ю. // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27, № 2-3. – С. 57-66.

5. Фадеев В.Е. Исследование предела огнестойкости экранных стен [Текст] / Фадеев В.Е. // Пожарная безопасность. 2019. – № 2. – С. 49-53.

6. Фадеев В.Е. Пожарная опасность многофункциональных зданий [Текст] / Фадеев В.Е., Ушаков Д.В., Хасанов И.Р., Абашкин А.А., Фомин Н.В., Зуев С.А. // Пожарная безопасность. – 2019. – № 2. – С. 37-42.

Остальные публикации по теме диссертации:

7. Фадеев В.Е. Особенности применения противопожарных преград в виде экранных конструкций (стен) для защиты большепролетных пространств (на примере объектов транспортной инфраструктуры) [Текст] / Еремина Т.Ю. // Горение и проблемы тушения пожаров: материалы XXIX Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России.— Москва: ВНИИПО, 2017. — Ч. 2. — С. 38-41.

8. Фадеев В.Е. Инновационные решения в практике пожарной безопасности [Текст] / Еремина Т.Ю., Николаева Е.А., Минайлов Д.А. // Тезисы доклада на международной конференции «Система обеспечения пожарной безопасности. Состояние, тенденции, пути развития». – Военный институт (инженерно-технический) Военной Академии материально-технического обеспечения. – Санкт-Петербург. – 2017 – С. 96-102.

9. Фадеев В.Е. Основные решения по определению величины теплового излучения при применении экранной конструкции (на примере объектов транспортной инфраструктуры и транспорта) [Электронный ресурс] / Еремина Т.Ю. // сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции. — Москва. – 2017.— Режим доступа: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/>.

Подписано в печать 22.10.2019. Формат 60x84/1/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ № 256

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