

На правах рукописи



Безбородов Владимир Игоревич

**УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ПОЖАРЕ ФАСАДНЫХ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ**

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 пожарной безопасности в строительстве

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Казиев Махач Магомедович

Официальные оппоненты: Гаращенко Анатолий Никитович,
Доктор технических наук, доцент,
Акционерное общество «Центральный научно-
исследовательский институт специального
машиностроения», ведущий научный
сотрудник отделения прочности №9

Гравит Марина Викторовна,
Кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого», доцент Высшей школы
промышленного-гражданского и дорожного
строительства Инженерно-Строительного
института

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-
исследовательский центр «Строительство»

Защита состоится «18» декабря 2019 года в 14 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета Д 205.002.02 при Академии Государственной
противопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, г. Москва,
ул. Б. Галушкина, д.4.

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

<https://academygps.ru/upload/iblock/365/365fef153868d79ec8b0d8e05785dcb5.pdf>

Автореферат разослан «23 » октября 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сивенков Андрей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящей работе под устойчивостью при пожаре (пожароустойчивостью) светопрозрачного фасада понимается способность фасада противостоять разрушению в условиях реального пожара.

Критерием потери пожароустойчивости светопрозрачного фасада считается обрушение или выпадение фрагментов светопрозрачного заполнения фасада, способствующих распространению пожара по зданию.

Актуальность темы исследования

Пожары в высотных зданиях характеризуются разрушительными последствиями. По сведениям ФГБУ ВНИИПО МЧС России, в период с 1998 по 2018 годы в России зарегистрировано 820 пожаров в зданиях 25 этажей и более, из них 622 – в жилых зданиях. Примерами таких пожаров являются пожар в Мадриде (Испания) в 2005 г., в Грозном (Россия) в 2013 г., в Лондоне (Великобритания) в 2017 г. (рисунок 1).



а)

б)

в)

Рисунок 1 – Последствия пожаров в высотных зданиях:

а) г. Грозный, Россия; б) г. Лондон, Великобритания; в) г. Мадрид, Испания

Во всех случаях наблюдается один и тот же характер развития пожара: пламя распространяется по фасаду здания, переходя с этажа на этаж, не встречая на своем пути каких-либо преград, способных его остановить.

Все чаще фасады высотных зданий выполняются из светопрозрачных конструкций. Стекло, обладая низкой устойчивостью к воздействию высоких температур, разрушаясь, дает возможность выходу пожара на фасад здания и дальнейшему его распространению на вышележащие этажи.

Для ограничения распространения пожара по фасаду предусматривается нормирование его пределов огнестойкости или устройство глухих междуэтажных огнестойких поясов, выполняющих роль барьеров, через которые пожар не должен перейти на вышележащий этаж. Однако с наружной стороны высотных зданий возникают сильные восходящие воздушные (конвективные) потоки, способные оказывать влияние на характер развития внешнего пожара, значительно увеличивая высоту пламени. В 1980 г. о влиянии ветра на внешний пожар утверждал и доктор технических наук Н.П. Копылов.

Объективная необходимость создания эффективных способов защиты светопрозрачных фасадов высотных зданий от негативного воздействия пожара определяет актуальность настоящего исследования.

Степень разработанности темы исследования

Изучению характера поведения стекла в условиях пожара и факторов, оказывающих влияние на его разрушение, посвящено множество работ российских и зарубежных исследователей (М.М. Казиев, А.В. Дудунов, Е.В. Зубкова, Г.К. Святкин, В.В. Лицкевич, А.В. Карпов, P.J. Pagni, A.A. Joshi, T. J. Shields, G.W. Silcock, F.W. Mowrer и другие). Существующие теории разрушения стекла и установленные критерии оценки устойчивости стекла при пожаре основаны на результатах лабораторных и крупномасштабных экспериментов. В ходе исследований М.М. Казиевым было установлено, что главным критерием, способствующим разрушению стекла, является скорость нарастания теплового воздействия на него. В условиях реальных пожаров при выходе пламени на фасад здания происходит быстрый рост температуры вдоль плоскости фасада. На сегодняшний день отсутствуют сведения о поведении стекол при внешнем воздействии пожара, а также отсутствует методика прогнозирования разрушения оконного светопрозрачного заполнения, расположенного над этажом пожара, и распространения пожара по зданию.

Характер воздействия пожара, вышедшего из окна горящего помещения, на строительные конструкции изучали российские и зарубежные ученые (И.С. Молчадский, И.Р. Хасанов, S. Yokoi, I. Oleszkiewicz, P.H. Thomas, M. Law, M. Delichatsios и другие). По результатам многочисленных теоретических и экспериментальных исследований были получены зависимости, позволяющие определять высоту пламени и характер распределения температуры вдоль плоскости фасада здания. Однако в ходе этих исследований не учитывались сопутствующие факторы, характерные для высотных зданий со светопрозрачными фасадами. По данным исследований профессора Ю.А. Табунщикова, вдоль светопрозрачных фасадов высотных зданий возникают естественные конвективные потоки, вызванные разностью температур окружающего воздуха и поверхности фасада, нагреваемого солнечной радиацией. Скорость конвективных потоков достигает 10 м/с, этот факт может оказать существенное влияние на динамику и характер распространения пожара по вертикали здания.

Дальнейшие исследования обусловлены необходимостью расширить познания о степени влияния конвективных потоков на характер распределения температурных полей пожара вдоль плоскости фасада, получить данные о поведении стеклопакетов и светопрозрачных конструкций при различных температурных режимах пожара, а также выявить зависимости для методики расчета устойчивости при пожаре светопрозрачных конструкций и обоснования противопожарных требований, направленных на повышение пожарной безопасности высотных жилых зданий со светопрозрачными фасадами.

В настоящее время нормативными документами по пожарной безопасности определено, что в высотных зданиях следует предусматривать мероприятия по ограничению распространения пожара по фасаду здания.

Однако дополнительных рекомендаций по применению тех или иных мероприятий, а также методов оценки их эффективности не приводится.

К мероприятиям по ограничению распространения пожара по фасаду относятся активные и пассивные меры противопожарной защиты зданий. Активные меры – это устройство систем автоматического пожаротушения или водяного орошения светопрозрачных фасадов зданий, к пассивным относят конструктивные решения фасадов или зданий, препятствующие выходу пламени на фасад, или локализирующие его размеры в принятых границах (огнестойкий фасад, вертикальный междуэтажный пояс или горизонтальный козырек).

Наиболее надежными и эффективными считаются пассивные методы противопожарной защиты, на работу которых не оказывают влияние внешние факторы, такие как долговечность, наработка на отказ, сохранность и ремонтпригодность.

Оценить эффективность применения тех или иных способов защиты светопрозрачных фасадов зданий возможно только на основании результатов научных исследований, нашедших свое отражение в критериях безопасности, методах их определения или сформулированных требованиях нормативных документов по пожарной безопасности.

Так, японский ученый S. Yokoі путем многочисленных огневых экспериментов установил, что горизонтальный козырек размером 0,74 м, расположенный над окном горящего помещения, не позволяет пламени разрушить вышележащее окно. Результаты этих исследований внесли вклад в нормативные требования многих стран.

Однако горизонтальные козырьки не сочетаются с архитектурным обликом зданий, имеющих светопрозрачные фасады, поэтому наиболее эффективным способом ограничения распространения пожара по фасаду здания остается устройство огнестойких фасадов.

Зачастую при строительстве зданий со светопрозрачными фасадами, огнестойкие светопрозрачные конструкции заменяют на обычные, компенсируя это огнестойким междуэтажным поясом высотой 1,2 м, предназначенным для ограничения распространения пожара между этажами, а в некоторых случаях (при разработке СТУ) при уменьшении высоты указанного пояса предусматривают водяное орошение стекол.

Результаты научных исследований зарубежных ученых I. Oleszkiewicz и H. Longhua позволили им сделать вывод о том, что на высоту пламени пожара, выходящего из окна горящего помещения, влияет мощность очага пожара, а также соотношение размеров оконного проема.

Справедливо предположить, что одним из активных методов ограничения распространения пожара по фасаду здания может быть снижение размеров (площади) оконного проема, через который пламя может выходить наружу.

Применение стекол в качестве основных ограждающих конструкций зданий, в том числе и высотных, поиск новых способов защиты стекол от негативного воздействия температуры пожара, а также ограничения его

распространения по фасадам зданий определяют необходимость и актуальность дальнейших исследований.

Цель исследования заключается в определении характера распределения температурных полей по фасаду здания, для обоснования технических решений по защите от разрушения светопрозрачных конструкций и предотвращению распространения пожара по фасаду высотных жилых зданий.

Задачи исследования:

– разработать алгоритм расчета необходимой и достаточной устойчивости светопрозрачного заполнения на вышележащем этаже относительно этажа пожара при максимальном его развитии;

– разработать методику натурального огневого испытания по оценке пожароустойчивости светопрозрачного фасада высотного жилого здания;

– установить характер распределения температурных полей по высоте фасада высотного жилого здания при максимальной степени развития пожара;

– установить влияние междуэтажных поясов на распространение пожара по светопрозрачному фасаду высотного жилого здания;

– определить влияние площади оконного проема на распределение температурных полей по высоте фасада здания при максимальном развитии пожара.

Объектом исследования являются светопрозрачные фасадные конструкции высотных жилых зданий.

Предметом исследования является устойчивость при пожаре фасадных светопрозрачных конструкций высотных жилых зданий.

Научная новизна работы заключается в:

– теоретическом обосновании алгоритма оценки устойчивости светопрозрачной фасадной конструкции при пожаре в жилом высотном здании;

– разработке методики натурального огневого испытания по оценке пожароустойчивости светопрозрачного фасада высотного жилого здания;

– получении сведений о характере распределения температурных полей по фасаду высотного жилого здания при максимальной степени развития пожара;

– определении предельных состояний и критериев разрушения светопрозрачного заполнения фасада помещения очага пожара;

– определении высоты пламени над помещением очага пожара от площади разрушенного оконного проема;

– получении данных о характере распределения температурных полей по высоте фасада здания при скорости восходящих воздушных потоков (3 м/с), характерных для высотных зданий.

Теоретическая значимость работы:

– установлены предельные состояния и выявлены критерии разрушения светопрозрачных конструкций при пожаре в высотных жилых зданиях;

– установлена зависимость температурных полей по высоте фасада от площади оконного заполнения помещения очага пожара;

– установлена зависимость, позволяющая спрогнозировать значения температурных полей вдоль плоскости фасада в зависимости от среднеобъемной температуры помещения очага пожара;

– установлено влияние скорости восходящих потоков, равной 3 м/с, на высоту пламени, выходящего из окна горящего помещения.

Практическая значимость работы:

– разработанный алгоритм расчета позволяет спрогнозировать характер распределения температурных полей вдоль плоскости фасада высотного жилого здания, на основании чего можно определить требования к показателям устойчивости при пожаре светопрозрачных конструкций и обосновывать противопожарные мероприятия по предотвращению распространения пожара по светопрозрачным фасадам высотных жилых зданий;

– разработана методика натуральных огневых испытаний по оценке пожароустойчивости светопрозрачного фасада высотных жилых зданий;

– в условиях двух натуральных огневых экспериментов установлены параметры развития пожара, особенности и критерии разрушения светопрозрачного фасада высотных жилых зданий, а также характер распределения температурных полей по высоте светопрозрачного фасада;

– установлена степень влияния междуэтажного пояса на предотвращение распространения пожара по светопрозрачному фасаду высотного жилого здания;

– в условиях натуральных испытаний установлена эффективность снижения (перекрытия) площади оконного проема помещения очага пожара для понижения высоты пламени и интенсивности теплового воздействия на оконные конструкции вышележащего этажа. Одним из способов достижения этой цели является применение опускающегося экрана из негорючих материалов.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных задач применены теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретический метод основан на решении задач теплового режима твердых тел и анализе критериев разрушения светопрозрачных конструкций при пожаре. Экспериментальный метод основан на выявлении зависимостей между параметрами пожара и критериями разрушения светопрозрачного фасада на этаже пожара и вышележащих этажах.

Экспериментальный метод предназначен для:

– выявления максимального температурного режима пожара, который может быть в жилых высотных зданиях;

– получения новых данных о высоте пламени и температурных полях, формируемых по высоте фасада на максимальной стадии развития пожара в жилых высотных зданиях;

– определения предельных состояний и критериев разрушения стеклопакетов в наружных стенах очага пожара и при внешнем тепловом воздействии;

– определения эффективности применения огнезащитного экрана, снижающего площадь оконного проема, предназначенного для снижения высоты пламени и предотвращения разрушения светопрозрачного фасада вышележащего этажа.

Основные положения, выносимые на защиту:

– алгоритм определения необходимой и достаточной устойчивости светопрозрачного заполнения на вышележащем этаже относительно этажа пожара при максимальном его развитии;

– методика натурального огневого испытания по оценке пожароустойчивости светопрозрачного фасада высотного жилого здания;

– расчетные и экспериментальные значения температурных полей над помещением очага пожара в зависимости от среднеобъемной температуры и площади вскрытого остекления;

– результаты теоретического расчета и результаты двух натуральных огневых испытаний по изучению устойчивости светопрозрачного фасада при реальном пожаре в жилом высотном здании.

Степень достоверности результатов работы.

Достоверность метода определения устойчивости при пожаре светопрозрачной фасадной конструкции определена:

– использованием поверенного оборудования и достаточной точностью средств измерения;

– использованием обоснованных математических моделей, применяемых для решения задач по определению параметров пламени;

– проведением двух натуральных испытаний светопрозрачных фасадов в условиях реальных пожаров, характерных для жилых высотных зданий;

– удовлетворительной сходимостью результатов эксперимента и теоретических расчетов.

Апробация результатов.

Материалы диссертационной работы внедрены при разработке:

- проекта свода правил «Здания и комплексы высотные. Требования пожарной безопасности», а также в учебном процессе в ЦНИИП Минстроя России, в том числе при подготовке учебно-консультационных семинаров «Комплексная безопасность навесных фасадных систем и светопрозрачных конструкций: нормативные требования, стандарты, проектирование, расчеты, испытания, сертификация, экспертиза» и «Обеспечение пожарной безопасности объектов капитального строительства при проектировании и экспертизе» ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России»;

- новой редакции свода правил СП 2.13130 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты», в части касающейся обоснования требований пожарной безопасности к светопрозрачным наружным стенам зданий, о чем имеется акт внедрения от ФГБУ ВНИИПО МЧС России;

- методического пособия «Наружные светопрозрачные стены. Пожарная опасность», выполняемого по заданию Департамента надзорной и профилактической работы МЧС России;

- проектной документации «Жилого комплекса по ул.Березка в г.Оренбурге с нежилыми помещениями на 1 и 2 этаже», выполняемой акционерным обществом научно-производственное объединение проектный институт «Оренбурггражданпроект»;

- проектной документации для следующих объектов: «Детская поликлиника на 320 посещений в смену, ул. Академика Анохина, вл.40, район Тропарево-Никулино» (0173200001516000331/2016) и «Детская поликлиника на 320 посещений в смену, район Ховрино, ул.Зеленоградская, д.27, корп.1, выполняемых акционерным обществом научно-проектный центр по объектам здравоохранения и отдыха «ГИПРОЗДРАВ»;

- проектной документации «Автосалона Mercedes-Benz в городе Оренбург», выполняемой компанией ООО «Техстромпроект».

Основные результаты доложены на:

– международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2012» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2012 г.);

– VI научно-практической конференции «Ройтмановские чтения» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018 г.).

Публикации.

По теме научно-квалификационной работы опубликовано 6 научных работ, из них 4 статьи – в рецензируемых журналах из перечня ВАК.

Структура, объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержание работы изложено на 161 странице текста, включает в себя 6 таблиц, 51 рисунок, 36 формул, список литературы из 93 наименований, приложения на 37 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, проанализированы объект и предмет исследования, представлены научная новизна работы и ее практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, а также степень достоверности и апробация результатов.

В **главе 1** выполнен анализ применяемых в строительстве видов светопрозрачных конструкций фасадов зданий, рассмотрены их особенности применения, достоинства и недостатки. Установлено, что наибольшее распространение получила стоечно-ригельная система, изготавливаемая из алюминиевых стоек и ригелей, имеющая светопрозрачное заполнение из различных типов стеклопакетов, как огнестойких, так и из обычного листового стекла. В подавляющем большинстве светопрозрачное заполнение принимается

не огнестойким, при этом для ограничения распространения пожара по фасаду предусматривают глухие междуэтажные пояса высотой 1,2 м (рисунок 1).

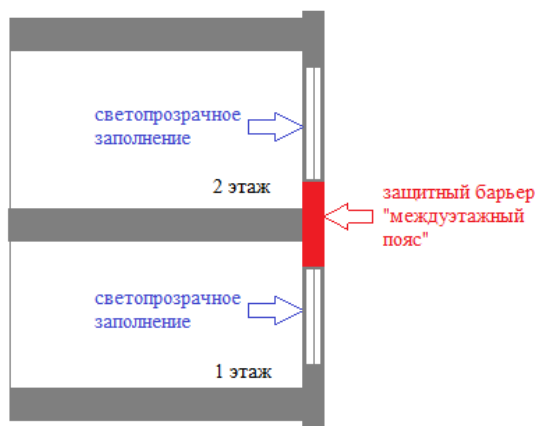


Рисунок 1 – Фрагмент разреза здания с междуэтажным поясом

Анализ пожаров в высотных зданиях показывает, что пожар зачастую распространяется с наружной стороны здания, в результате перехода пламени через оконные проемы, обладающие низкой устойчивостью к воздействию высоких температур.

Для ограничения распространения пожара с наружной стороны здания сегодня широко используются несколько способов (рисунок 2):

- изготовление огнестойких фасадов на основе стеклопакетов со специальными гелевыми составами, при нагревании которых образуется теплоизолирующий слой, защищающий стеклопакет от разрушения;
- применение специальных систем водяного орошения светопрозрачных конструкций, снижающих тепловое воздействие от пожара;
- использование специальных огнестойких штор, экранирующих температурное воздействие на стекло;
- устройство междуэтажных поясов, балконов, козырьков для изменения конфигурации пламени и недопущения его воздействия на стекло (данные конструктивные способы применяются исключительно на фасадах зданий).

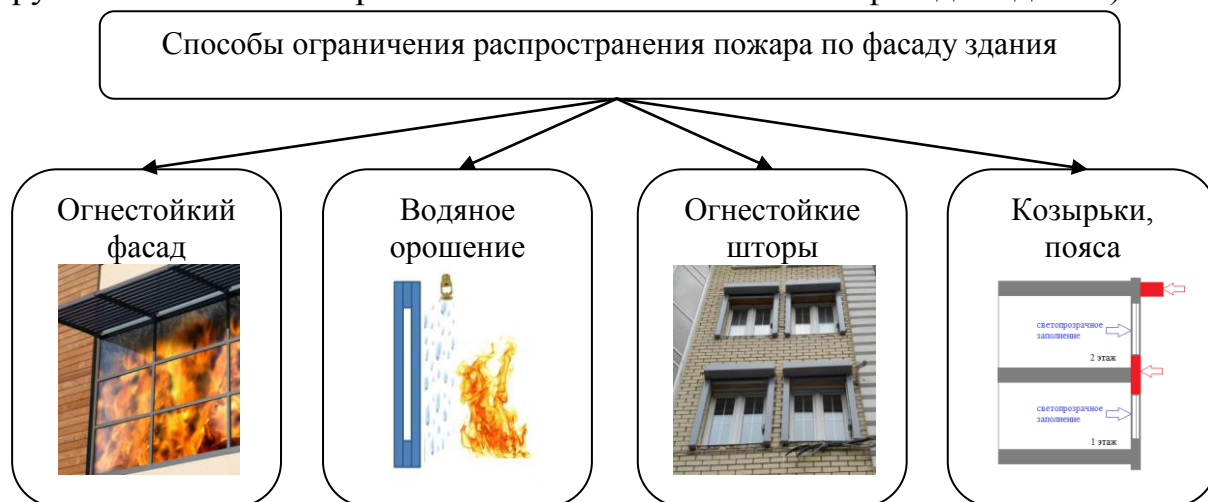


Рисунок 2 – Способы ограничения распространения пожара по фасадам зданий

Для прогнозирования развития пожара с наружной стороны и оценки необходимости и достаточности применяемых способов ограничения распространения пожара необходимо определить факторы, влияющие на разрушение светопрозрачных конструкций и распространение пожара по высотному зданию. По результатам анализа научных, публицистических и справочных источников установлено, что к таковым факторам следует относить: повышенную сложность тушения пожара, определяемую продолжительностью пожара; низкую устойчивость стекла к воздействию высоких температур; влияние вертикально направленных ветровых потоков на размеры пламени.

Таким образом, определена актуальность проводимого исследования, состоящая в необходимости обоснования технических решений, направленных на ограничение распространения пожара по светопрозрачным фасадным конструкциям.

Зарубежными и российскими учеными проведены многочисленные исследования по оценке факторов, влияющих на формирование пламени, выходящего на фасад здания. Установлено, что на высоту пламени и размеры температурных полей, формируемых вдоль плоскости фасада здания, оказывает влияние соотношение сторон открытого проема, а также параметры горючей нагрузки. На основании экспериментальных исследований сформулированы эмпирические зависимости, позволяющие расчетным путем спрогнозировать размеры пламени. Однако данные зависимости не позволяют оценить дополнительного воздействия на высоту пламени внешнего вертикально направленного конвективного потока, формируемого вдоль плоскости светопрозрачного фасада здания. Этот факт ограничивает применимость данной теории для высотных зданий.

На сегодняшний день существует две теории, посвященные прогнозированию разрушения стекла в условиях пожара, первая основана на разности температур между открытой и закрытой частью стекла, вторая – на перепаде температуры по толщине стекла. Критерии разрушения стекла основаны на результатах экспериментов, при этом все исследования проводились исключительно при одностороннем тепловом воздействии. Проведенные Казиевым М.М. и Зубковой Е.В. экспериментальные исследования со стеклами различной толщины показали, что на разрушение стекла при пожаре главным образом оказывает влияние динамика нарастания температуры. Следует предположить, что при реальном пожаре в результате вскрытия светопрозрачных проемов и резкого выхода, высоко нагретых продуктов сгорания наружу будут созданы критические условия нарастания температуры на уровне вышележащего этажа, что значительно ускорит время разрушения стекол на верхнем этаже.

Проведенный обзор российских и зарубежных национальных стандартов показал гармонизацию методов оценки огнестойкости и пожарной опасности светопрозрачных конструкций. Однако сложившаяся в настоящее время в России система стандартизации не способствует проведению огневых испытаний, позволяющих объективно оценить реальную пожарную опасность светопрозрачного фасада здания. Применяемый ГОСТ Р 53308 дает

представление лишь об огнестойкости конструкции в условиях «стандартного» температурного режима с односторонним воздействием.

При оценке пожарно-технических характеристик светопрозрачных фасадов высотных зданий требуется учитывать увеличенную продолжительность пожара, возможность выхода пламени на фасад здания и воздействие его на вышерасположенные конструкции фасада. Также необходимо учитывать внешние факторы, способствующие распространению пожара, в частности, естественные конвективные потоки, направленные вдоль плоскости фасада.

Возможность прогнозирования температурных полей, воздействующих на фасад здания при наружном пожаре, а также известные данные параметров устойчивости светопрозрачных конструкций в условиях реального пожара позволят принять необходимые и достаточные меры, направленные на ограничение распространения пожара по светопрозрачным фасадам зданий, и повысить их пожароустойчивость.

В заключение главы сформулированы задачи исследования.

В главе 2 приведено обоснование применяемого в работе термина – устойчивость при пожаре (пожароустойчивость) светопрозрачного фасада – это способность фасада противостоять разрушению и предотвращать переход пожара на смежные этажи в условиях реального пожара. Критерием потери пожароустойчивости светопрозрачного фасада является обрушение или выпадение фрагментов светопрозрачного заполнения фасада, способствующих распространению пожара по зданию.

Установлены критерии разрушения светопрозрачных конструкций при пожаре. Выявлено, что все критерии являются эмпирическими данными, полученными в условиях маломасштабных экспериментов.

Сформулирована структурно-логическая модель алгоритма определения устойчивости при пожаре светопрозрачной фасадной конструкции. Данный алгоритм позволяет расчетным способом спрогнозировать распространение пожара по светопрозрачным конструкциям фасада и выбрать необходимые способы ограничения распространения пожара.

Предлагаемая модель подразумевает решение задачи в соответствии с алгоритмом, представленным в виде блок-схемы на рисунке 3.

Шаг 1 – формирование исходных данных для расчета температурного режима пожара;

задача 2 – определение параметров максимальной стадии развития пожара;

задача 3 – определение характера распределения температурных полей по фасаду над этажом пожара;

задача 4 – определение условия (критерия) пожароустойчивости светопрозрачных конструкций на вышележащем этаже.

Определение параметров на первых двух этапах алгоритма выполняется по известным теоретическим моделям развития пожара (зональный или полевой метод), также допускается применение упрощенных эмпирических зависимостей, известных из теории горения. На третьем и четвертом этапах необходимы знания о характере распределения температурных полей вдоль плоскости фасада здания и факторах оказывающих на них влияние. При этом

важным является знание критериев разрушения стеклопакета, как для внутреннего пожара, так и для пожара, воздействующего с наружной стороны здания.

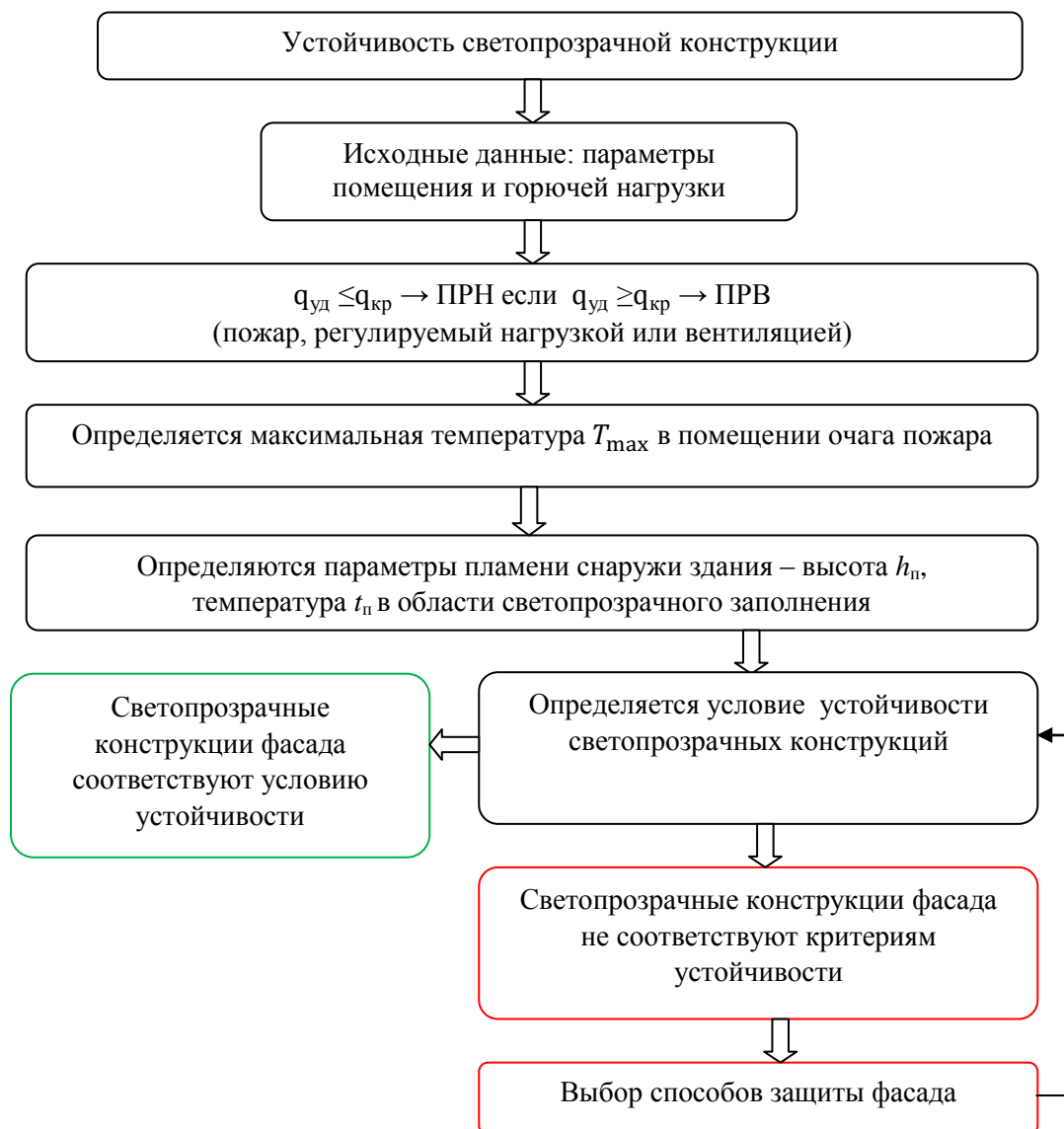


Рисунок 3 – Блок схема алгоритма определения устойчивости при пожаре светопрозрачной фасадной конструкции

Согласно предлагаемого алгоритма, параметры развития пожара в помещении определяются исходя из характера размещения горючей нагрузки и проёмности помещения (ПРН или ПРВ). Затем определяется среднеобъемная температура в помещении очага пожара.

Для определения степени влияния пожара на фасад здания определяется максимальное значение среднеобъемной температуры пламени на выходе из горящего помещения. Согласно принятому допущению считается, что светопрозрачное заполнение на уровне этажа пожара разрушено и пожар выходит наружу, воздействуя на фасад здания с внешней стороны.

В общем виде устойчивость светопрозрачного фасада здания при пожаре представлена в виде равенства:

$$Y_n = f(Q; \Pi; K) \quad (1)$$

где Y_n – устойчивость светопрозрачного фасада здания при пожаре; Q – характеристика, горючей нагрузки рассматриваемого здания; Π – параметры светопрозрачной конструкции; K – критерии разрушения стеклопакетов конструкции фасада.

Высота пламени и температура вдоль плоскости фасада может быть определена следующими эмпирическими зависимостями:

$$h = 12.8 \left(\frac{v_m}{b} \right)^{2/3} - a \quad (2)$$

$$T_{\text{оп}} = T_0 + \frac{520}{\left(1 - \frac{0.027hb}{v_m} \right)} \quad (3)$$

$$T_h = T_0 + (T_{\text{оп}} - T_0) \left(1 - 0.027 \frac{hb}{v_m} \right) \quad (4)$$

где a – высота оконного проема, м; b – ширина оконного проема, м; T_h – температура на высоте z ; T_0 – температура окружающей среды; $T_{\text{оп}}$ – температура в оконном проеме; h – расстояние вдоль оси пламени, м; v_m – массовая скорость выгорания, кг/с.

В случае если высота пламени, выходящего из окна, такова, что воздействует на светопрозрачное заполнение вышележащего этажа, при этом температура в зоне воздействия на стеклопакет превышает критические значения критериев его разрушения, необходимо предусматривать средства ограничения распространения пожара по фасаду здания. Эффективность предлагаемых средств и способов ограничения распространения пожара подтверждается повторным расчетом, либо в условиях огневых испытаний.

Применение зависимостей (2), (3) и (4) ограничено для высотных зданий в связи с тем, что они не учитывают влияния конвективного вертикально направленного потока, присущего для высотных зданий. Конвективный поток оказывает влияние на распределение температурных полей от пожара, вышедшего из окна горящего помещения.

При определении характера распределения температурных полей пожара, выходящего из окна горящего помещения высотного здания, следует учитывать следующую функцию:

$$T_h \rightarrow f(h; S; K_h), \quad (5)$$

где T_h – температура вдоль плоскости фасада на высоте h , °C; h – высота, м; S – площадь проема для выхода пламени, м²; K_h – коэффициент распределения температуры по высоте фасада.

На сегодняшний день отсутствуют исследования, направленные на изучение характера распределения температурных полей пожара, выходящего на фасад высотного здания. Получение объективных данных о характере распределения температурных полей вдоль плоскости фасада возможно только в результате подготовки и проведения натурного огневого эксперимента, позволяющего установить влияние ветра на высоту пламени.

В ходе анализа критериев разрушения светопрозрачных конструкций установлено, что на разрушение стекла при пожаре главным образом оказывает влияние динамика нагрева стекла. А общепринятым критерием разрушения листового стекла, установленным в результате экспериментов, в ходе которых реализован «стандартный» температурный режим пожара, принято достижение на необогреваемой стороне стекла температуры 110 °С. Критерии оценки устойчивости светопрозрачных конструкций и стеклопакетов от воздействия пожаров с наружной стороны зданий в научных источниках отсутствуют. Для получения данных значений требуется проведение дальнейших исследований.

В главе 3 представлена методика проведения и результаты натурного огневого испытания, цели и задачи которого заключались в следующем:

- 1) определить максимальный режим температурного воздействия на фасад здания при пожаре в жилом высотном здании;
- 2) установить характер распределения температурных полей по высоте фасада над этажом пожара;
- 3) определить скорость прогрева стеклопакета и критический режим температурного воздействия пожара, при котором происходит разрушение стеклопакета и потеря его целостности;
- 4) определить влияние площади оконного проема на размер пламени и высоту температурных полей, формируемых вдоль плоскости фасада;
- 3) определить влияние ветровых (конвективных) потоков, направленных вдоль фасада здания на размеры температурных полей, формируемых вдоль плоскости фасада.

В качестве объекта испытаний принята навесная светопрозрачная стена с глухим междуэтажным поясом высотой 1,2 м и светопрозрачным заполнением стеклопакетами из листового стекла (формула стеклопакета 6+12+4+12+6) (Рисунок 4). Испытуемый фрагмент выполнен в виде трехэтажного фасада высотой 9,125 м, шириной 3,2 м.

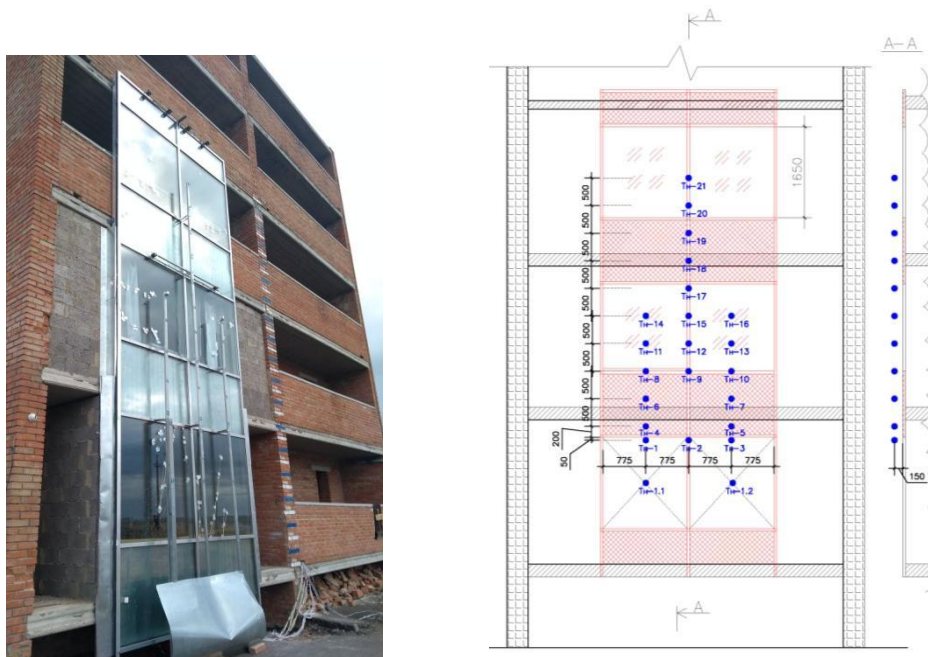


Рисунок 4 – Общий вид навесной светопрозрачной стены со схемой размещения термопар на фасаде здания

Температурный режим пожара в помещении площадью 33 м² обеспечивался горючей нагрузкой, плотность размещения которой составляла 50 кг/м². В качестве горючей нагрузки использовалась древесина хвойных пород влажностью от 10 до 12 %. Характер размещения горючей нагрузки соответствовал условиям наиболее распространенной расстановки мебели в жилых помещениях.

Для реализации условий, характерных для высотных зданий, создавался вертикально направленный поток воздуха, скорость которого измерялась на уровне центра оконного заполнения этажа пожара и составляла 3 м/с. Для этого использовались вентиляторы, размещаемые в нижней части фасада, и специальные лотки, направляющие воздушный поток вдоль фасада по всей его ширине.

Данные о характере развития пожара и распределения температурных полей по фасаду здания с наружной стороны были получены с помощью термопар и анемометров, расставленных в соответствии с разработанной специальной программой и методикой проведения эксперимента (Рисунок 4). Дополнительно осуществлялась тепловизионная съемка, а также фото- и видеофиксация внутри помещения очага пожара и с наружной стороны здания.

Проведенное испытание позволило установить существенные различия в характере поведения светопрозрачных конструкций в условиях внутреннего и внешнего теплового воздействия. В отличие от внутреннего, пожар, вышедший наружу, имеет высокий импульс воздействия на фасад здания. Температура и тепловой поток уже на выходе имеют критические для светопрозрачных конструкций значения, что приводит к динамичному нагреву стеклопакетов, их разрушению и переходу пламени на вышележащие этажи.

Установлено, что высота пламени пожара в ходе эксперимента составила 3 м (рисунок 5), в отдельные непродолжительные моменты выброс пламени достигал 5 м.

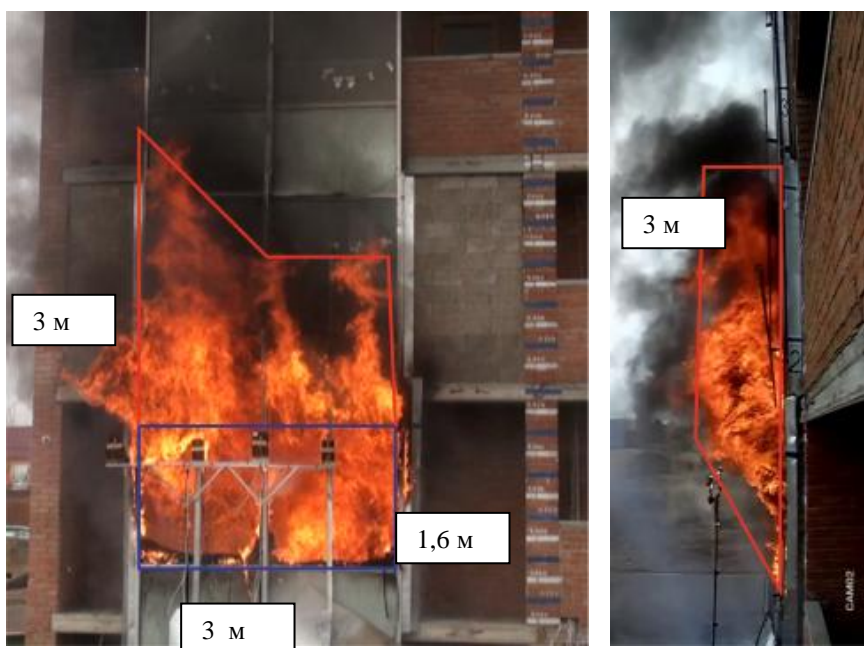


Рисунок 5– Характерные размеры пламени при выходе из проема 3×1,6 м

По результатам измерений температурных полей, формируемых с наружной стороны вдоль плоскости фасада здания, установлено, что температура в районе оконного заполнения второго этажа изменяется от 550 до 650 °С (рисунок 6).

Разрушение стеклопакета размером 1551×1676 мм, выполненного из листового стекла по формуле 6+12+4+12+6, при внутреннем пожаре наступило при достижении среднеобъемной температуры равной 830 °С.

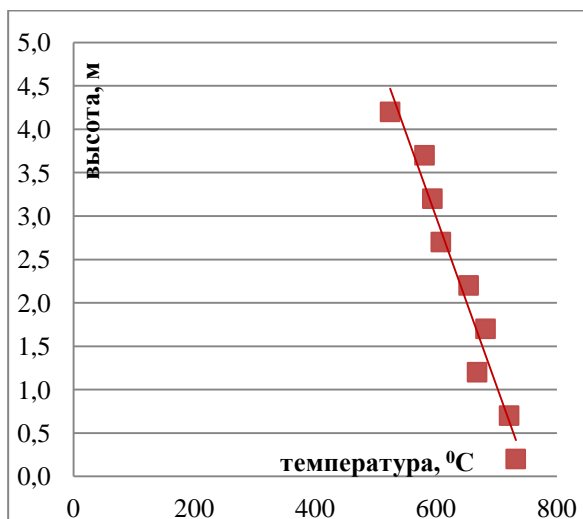


Рисунок 6 – Распределение температуры вдоль плоскости фасада при выходе пламени наружу в период максимального развития пожара

Потеря устойчивости светопрозрачного заполнения над этажом пожара наступила через 5 минут воздействия пламени. Критическим режимом нагрева стеклопакета является режим, выраженный зависимостью (6), обеспечивающий нарастание температуры в зоне воздействия на стеклопакет до 650 °С в течение 5 минут (рисунок 7):

$$T = 237,5 \tau - 20,9 \tau^2 + T_n \quad (6)$$

где T – температура в области оконного заполнения, °С; τ – время, мин.; T_n – начальная температура окружающей среды, °С.

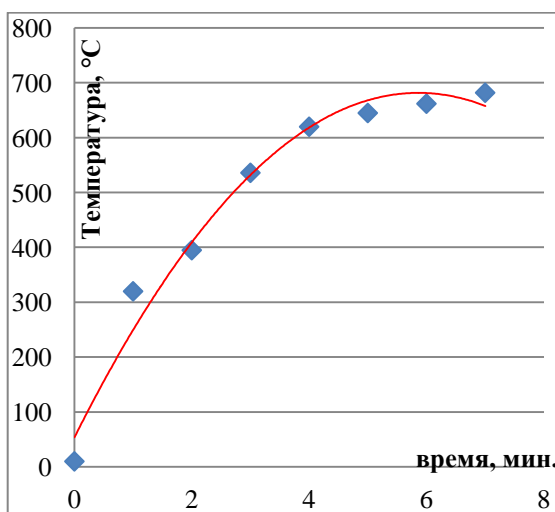


Рисунок 7 – Критическая зависимость роста температуры в зоне воздействия на светопрозрачную конструкцию

По результатам проведенного исследования установлена зависимость температуры T_h на высоте h вдоль плоскости фасада здания от среднеобъемной температуры пожара. На рисунке 8 представлена аппроксимация полученных температурных полей в зависимости от высоты и коэффициента корреляции среднеобъемной температуры в помещении очага пожара и температуры вдоль плоскости фасада.

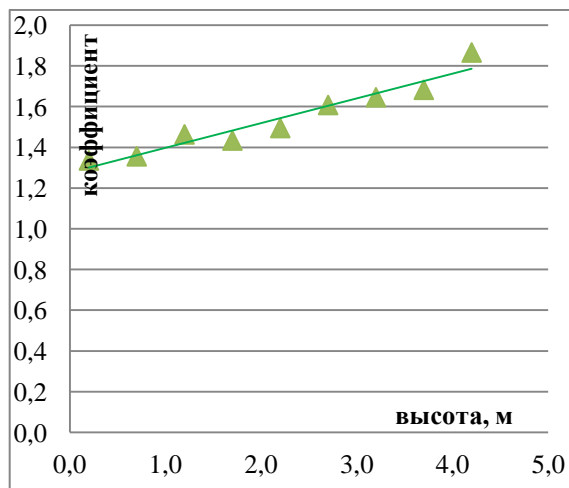


Рисунок 8 – Коэффициент распределения температурного потока по высоте

Получена зависимость коэффициента распределения температурного потока K по высоте здания с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,93$ (7). Данная зависимость справедлива для распределения температуры на высотах от 0 до 5 м.

$$K_h = 0,12h + 1,3, \quad (7)$$

где h – высота по плоскости фасада относительно верхнего среза оконного проема, м.

Зная среднеобъемную температуру внутри помещения очага пожара в жилом высотном здании можно установить температурное поле, формируемое выходящим пламенем вдоль плоскости фасада, по формуле:

$$T_h = \frac{T_{cp}}{0,12h + 1,3} \quad (8)$$

где T_h – температура вдоль плоскости фасада на высоте h , °С, T_{cp} – среднеобъемная температура внутри помещения очага пожара, °С.

Анализ результатов испытания позволил установить, что величина температурных полей зависит от площади проема, через который пламя пожара выходит на фасад здания. Для практического применения результатов испытаний представим их в виде изотерм (рисунок 9), наглядно показывающие характер распределения температурных полей вдоль плоскости фасада при различных проемах для выхода пламени.

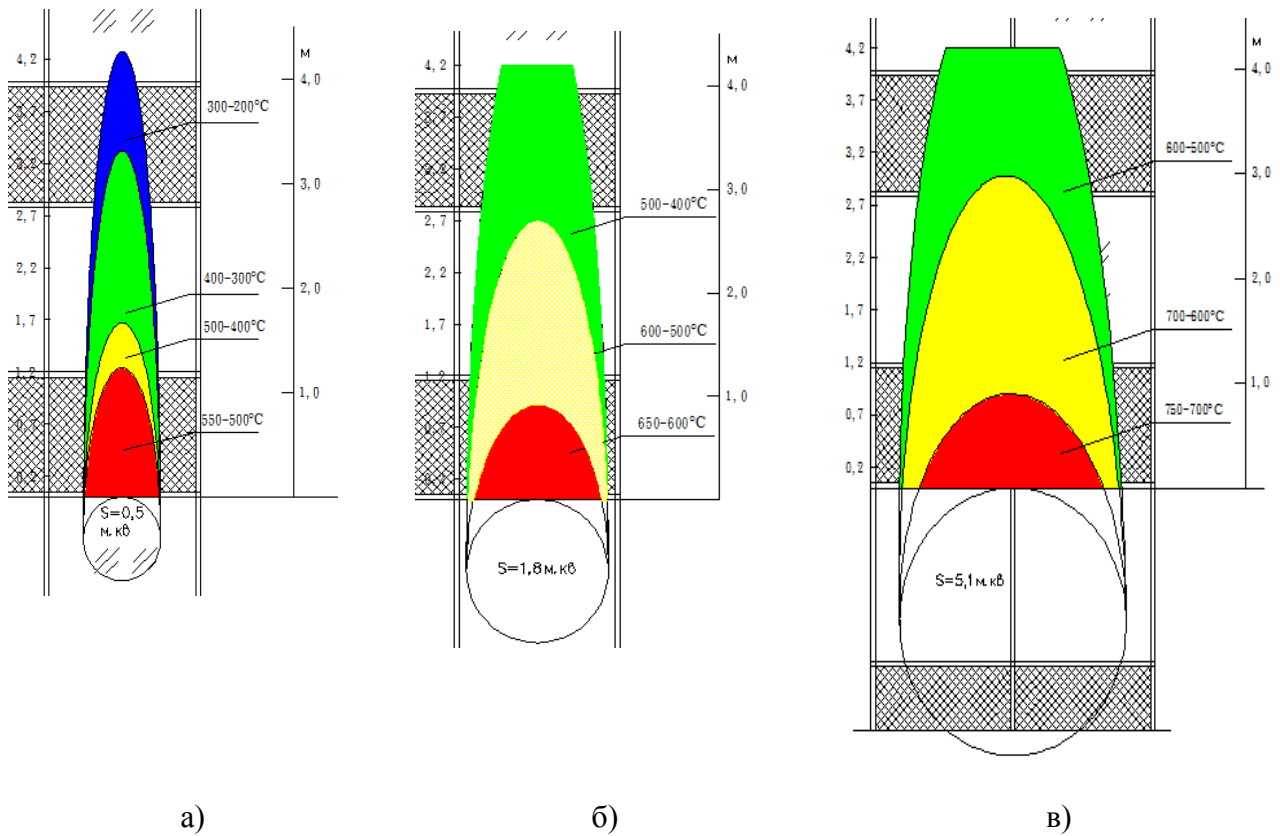


Рисунок 9 – Поля температур вдоль плоскости фасада здания при различных площадях разрушения оконного проема на этаже пожара: а) 0,5 м²; б) 1,8 м²; в) 5,1 м²

Полученные результаты измерений температуры прогрева стеклопакета при внешнем пожаре представлены на рисунке 10.

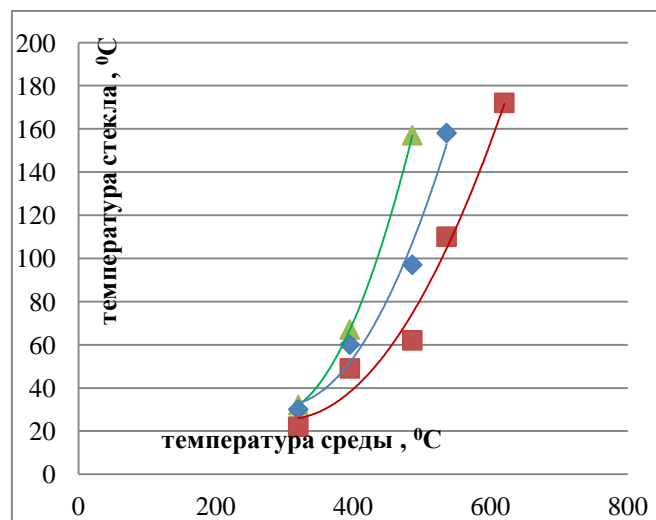


Рисунок 10 – Зависимость температуры стекла от температуры среды вдоль плоскости фасада

Установлено, что температура на поверхности стеклопакета в максимальный момент развития пожара в 3,5 раза меньше температуры среды.

По результатам сравнительного расчета экспериментальных данных и данных температуры наружного пожара на различной высоте, определяемой по формуле (8), установлена удовлетворительная сходимость результатов (более 85 %).

Как показало проведенное натурное огневое испытание, междуэтажный пояс высотой 1,2 м не способен предотвратить распространение пожара по светопрозрачным фасадам высотных зданий. Это обстоятельство требует поиск новых дополнительных мероприятий, направленных на ограничение распространения пожара по фасаду высотного жилого здания.

В главе 4 предложен новый способ ограничения распространения пожара по фасаду здания, основанный на снижении площади оконного проема горящего помещения. Также представлена методика проведения и результаты натурального огневого испытания, цель которого заключалась в оценке эффективности предлагаемого способа ограничения распространения пожара по светопрозрачному фасаду здания.

Испытанию подвергался способ ограничения распространения пожара, основанный на снижении площади оконного проема светопрозрачной фасадной конструкции.

В ходе испытания решались следующие задачи:

1) определить скорость прогрева стеклопакета и критическую температуру, при которой происходит разрушение листового стекла и потеря целостности стеклопакета в целом;

2) определить распределение температурных полей вдоль плоскости фасада при различной площади оконных проемов горящего помещения;

3) определить влияние площади оконного проема на пожароустойчивость светопрозрачной конструкции фасада.

Предлагаемый способ ограничения распространения пожара по фасаду здания направлен на снижение параметров температурных полей, формируемых вдоль плоскости фасада пламенем, выходящим из оконного проема горящего помещения. Реализация предлагаемого способа осуществляется посредством уменьшения площади оконного проема при помощи защитного экрана из стального оцинкованного листа металла толщиной 0,7 мм, шириной равной ширине оконного проема, высотой 1 м (далее – защитный экран). Защитный экран крепится к фасаду здания при помощи шарниров в положение, не перекрывающее проем первого этажа (рисунок 11). В ходе проведения испытания защитный экран принудительно по команде оператора переводится в рабочее положение (рисунок 11) после разрушения оконного проема первого этажа и выхода пламени на фасад здания.

Для оценки эффективности защитного экрана осуществляется фото- и видеофиксация размеров пламени до и после опускания экрана, а также осуществляется измерение температурных полей вдоль плоскости фасада.

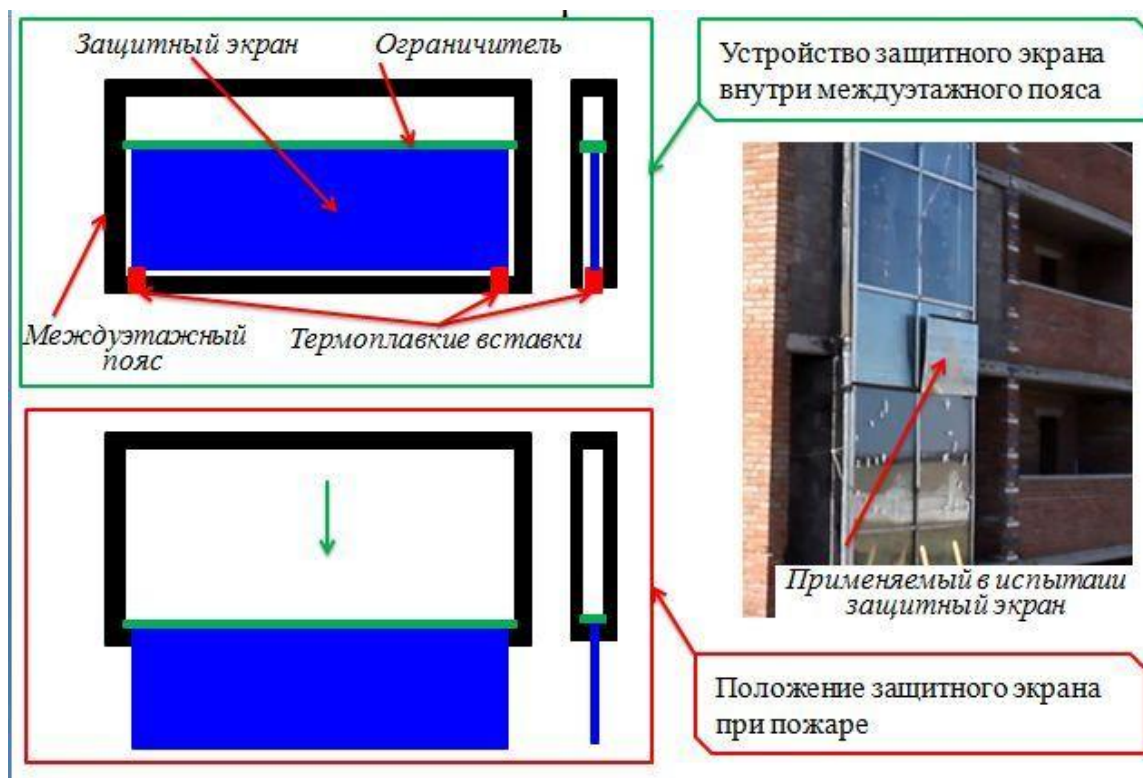


Рисунок 11 – Принципиальная схема установки защитного экрана

Параметры светопрозрачной навесной стены помещения очага пожара, тип и характер размещения пожарной нагрузки, а также условия воздухообмена и внешнего ветрового потока вдоль плоскости фасада, созданные в ходе испытания, полностью соответствуют параметрам предыдущего испытания.

Характер развития пожара во втором эксперименте показал высокую сходимость результатов с параметрами развития пожара при первом испытании.

Разрушение светопрозрачного заполнения на этаже пожара произошло на 34 минуте при среднеобъемной температуре в помещении 880 °С.

Разрушение закаленных стекол междуэтажного пояса произошло через 3 минуты после выхода пожара на фасад здания.

Защитный экран был приведен в рабочее состояние в течение одной минуты с момента выхода пламени на фасад здания.

Результаты измерений температурных полей вдоль плоскости фасада показали, что критическая температура в области стеклопакета вышележащего этажа не превысила критического значения, установленного при первом натурном испытании (650 °С), фактическое ее значение составило 490 °С. Значение температурных полей в зоне светопрозрачного заполнения второго этажа не способствовало полному разрушению стеклопакета.

Сравнительный график динамики роста температуры в зоне светопрозрачного остекления второго этажа без защитного экрана и с ним представлен на рисунке 12. По графику можно сделать вывод о том, что в зоне светопрозрачного заполнения не был создан критический режим нагрева светопрозрачной конструкции, способствующий шоковому разрушению светопрозрачного заполнения.

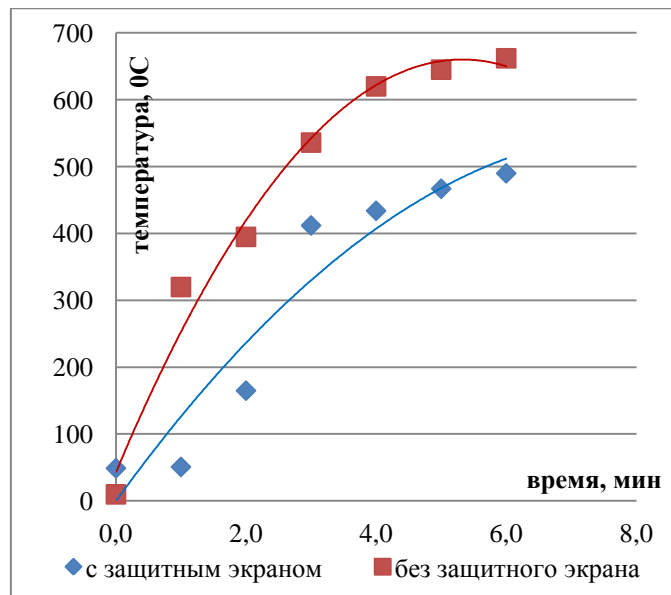


Рисунок 12 – Динамика роста температуры на фасаде без защитного экрана и с ним

По результатам анализа видеоматериалов установлено, что высота пламени после опускания защитного экрана снизилась до 1,5 м.

Эффективность предлагаемых способов ограничения распространения пожаров по светопрозрачным фасадам зданий подтверждается внешним видом фасадов после огневых испытаний (рисунок 13).



Рисунок 13 – Последствия воздействия пожара на светопрозрачный фасад здания: а) без защиты; б) с защитой

По результатам проведенного испытания можно сделать следующий основной вывод: защитный экран из негоряемого материала, уменьшающий площадь оконного проема, снижает температурное воздействие на светопрозрачное заполнение этажа, расположенного над пожаром. Установлено, что снижение площади разрушенного оконного проема более чем на 2/3 высоты снижает высоту выходящего пламени в 2 раза, это обеспечивает

сохранение устойчивости светопрозрачного заполнения и нераспространение пожара по фасаду высотного жилого здания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан алгоритм расчета необходимой и достаточной устойчивости светопрозрачного заполнения на вышележащем этаже относительно этажа пожара, применимый к высотным зданиям.

2. Разработана методика натурального огневого испытания по оценке пожароустойчивости светопрозрачных фасадных конструкций. Методика основывается на максимальном температурном режиме пожара, площади разрушения оконного ограждения помещения очага пожара и учитывает скорость восходящих воздушных потоков по высоте фасада здания.

3. Определен характер распределения температурных полей при максимальном развитии пожара и полном разрушении оконного остекления на этаже пожара. Установлено, что при разрушении светопрозрачного оконного заполнения площадью $4,8 \text{ м}^2$ и внешнем вертикальном воздушном потоке скоростью 3 м/с высота пламени пожара, вышедшего на фасад здания, достигает более 3 -х м, а максимальная температура в области светопрозрачного заполнения второго этажа достигает $650 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. Нарастание температуры в области светопрозрачного заполнения второго этажа на максимальной стадии развития пожара (в течении 10 минут) выражается зависимостью $t = 214,4\tau + 53,7 - 18,3\tau^2$.

5. Экспериментально установлена математическая зависимость и характер распределения температуры по высоте здания над этажом пожара ($T_h = \frac{T_{cp}}{0,12h+1,3}$) при известной температуре в помещении очага пожара, что позволяет проводить расчет времени разрушения светопрозрачного фасада. Результаты расчета показали удовлетворительную сходимость (85%) с данными натурального эксперимента.

6. Междуэтажный пояс высотой $1,2$ м не препятствует распространению пожара при площади разрушения оконного проема более $1,82 \text{ м}^2$.

7. Установлено влияние площади вскрытого оконного проема на температурные поля по высоте фасада над этажом пожара.

8. Доказана эффективность опускающегося защитного экрана как способа снижения (перекрывания) площади оконного проема помещения очага пожара с целью снижения высоты пламени и снижения интенсивности теплового воздействия на оконные конструкции вышележащего этажа. Установлено, что перекрытие разрушенного оконного проема на $2/3$ его высоты снижает высоту пламени над этажом пожара в 2 раза.

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

1. Безбородов, В.И. Защита триплекса при пожаре с помощью водяного орошения [Текст] / М.М. Казиев, Е.В. Зубкова, В.И. Безбородов // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – № 3. – С. 32–36.

2. Безбородов, В.И. Эффективность водяного орошения для защиты листового и закалённого стекла [Электронный ресурс]/ М. М. Казиев, Е.В. Зубкова, В.И. Безбородов // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. – 2014. – № 6 (58). – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-6/18-06-14.ttb.pdf>

3. Безбородов, В.И. Светопрозрачные фасадные системы: конструктивные особенности и противопожарное нормирование [Текст] / В.И. Безбородов, М.М. Казиев, Е.В. Зубкова // Пожарная безопасность. – 2016. – № 1. – С. 103–109.

4. Безбородов, В.И. Особенности обеспечения пожаростойкости наружных светопрозрачных стен [Текст] / В.И. Безбородов, Е.В. Вагенлейтнер, М.М. Казиев, Е.В. Зубкова // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2017. – № 2. – С. 68–72.

Остальные публикации по теме диссертации:

5. Безбородов, В.И. Защита светопрозрачных конструкций водяными завесами [Текст] // Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2012». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. – 259 с.

6. Безбородов, В.И. Устойчивость при пожаре светопрозрачного фасада высотного жилого здания [Текст] // Сборник докладов VI научно-практической конференции «Ройтмановские чтения». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 40–42.

Подписано в печать «15» октября 2019. Формат 60×84/1/16
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 777

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