

Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны,
чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий

УТВЕРЖДАЮ

Директор Департамента надзорной
деятельности и профилактической работы
действительный государственный советник
Российской Федерации 2 класса


С.П. Воронов

« 20 » 03 2025 г.

Пособие

по проведению численного эксперимента для моделирования динамики
распространения пожара между объектами при производстве
судебной нормативной пожарно-технической экспертизы

Москва - 2025 г.

УДК 614.841.4:62/69

Пособие по проведению численного эксперимента для моделирования динамики распространения пожара между объектами при производстве судебной нормативной пожарно-технической экспертизы / Лобова С.Ф., Бурцев А.М., Тумановский А.А., Хасанов И.Р. и др.; под общ. ред. Воронова С.П. – СПб.: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России», 2025. 71 с.

Настоящее пособие содержит методику проведения численного эксперимента для моделирования динамики распространения пожара между объектами при производстве судебной нормативной пожарно-технической экспертизы [15]. Рассматриваются случаи распространения пожара между жилыми и общественными зданиями и сооружениями, зданиями и сооружениями стоянок автомобилей, производственными и складскими зданиями и сооружениями.

Предложенный в настоящем пособии алгоритм моделирования динамики распространения пожара может быть использован для обоснования сокращения противопожарного расстояния между объектами.

Согласовано Департаментом надзорной деятельности и профилактической работы МЧС России.

Авторский коллектив: Лобова С.Ф., Бурцев А.М., Тумановский А.А., Карпов А.В., Хасанов И.Р., Петрова Н.В.

Оглавление

Введение	4
1. Критерий распространения пожара между объектами.....	7
2 Вопросы, поставленные на разрешение эксперту, касающиеся противопожарного расстояния между объектами.....	9
3 Алгоритм проведения численного эксперимента	14
3.1 Анализ рассматриваемого объекта и соседних зданий и сооружений. Определение необходимых для моделирования массива исходных данных	15
3.2 Определение сценариев пожара.....	16
3.3 Построение математической модели.....	16
3.4 Анализ результатов моделирования. Оценка погрешности.....	31
3.5 Разработка дополнительных мероприятий по предотвращению распространения пожара.....	32
3.6 Требования к оформлению отчета по результатам проведенного моделирования пожара	33
Список использованных источников.....	37
ПРИЛОЖЕНИЕ. Примеры использования методики проведения численного эксперимента для моделирования динамики распространения пожара между объектами защиты	39

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы соответствия объекта защиты требованиям пожарной безопасности, установление причинно-следственных связей между нарушениями требований пожарной безопасности и последствиями пожара требуют проведения детального и комплексного исследования объекта, в том числе с применением расчетных методов, моделирующих и реконструирующих развитие и распространение пожара в заданных условиях.

Одними из часто встречающихся вопросов, ставящихся на разрешение экспертам и специалистам при производстве пожарно-технических исследований в судебно-экспертных учреждениях федеральной противопожарной службы МЧС России (далее – СЭУ ФПС МЧС России), являются вопросы, связанные с распространением пожара. Данные вопросы могут ставиться как по произошедшим пожарам, так и потенциально возможным.

В рамках рассмотрения данных вопросов определяется и разъясняется механизм развития пожара и его динамика. При этом ответ должен содержать соответствующую аргументацию, включающую как качественную, так и количественную оценку параметров пожара [5].

В настоящем пособии рассматриваются случаи распространения пожара между жилыми и общественными зданиями и сооружениями, зданиями и сооружениями стоянок автомобилей с разрешенной максимальной массой не более 3,5 т, производственными и складскими зданиями и сооружениями (за исключением зданий и сооружений категорий по взрывопожарной и пожарной опасности А, Б, Г, а также относящихся к опасным производственным объектам) при любом их сочетании. Кроме этого, предложенный в методике алгоритм проведения моделирования динамики распространения пожара (далее – алгоритм) может быть использован для оценки возможности сокращения противопожарного

расстояния между перечисленными выше объектами при обосновании конкретных проектных решений. Однако следует помнить, что при расчетном обосновании сокращения противопожарных расстояний рассматриваются только аспекты предотвращения распространения пожара между объектами защиты без учета требований строительной, санитарной и экологической безопасности. Внедрение результатов должно проводиться при обязательном соблюдении требований к устройству проездов и подъездов для пожарной техники.

Рассмотренный в методике алгоритм не распространяется на наружные установки, а также не применим для оценки противопожарного расстояния до стен со стороны пристроенных котельных и до стен с наружным размещением газового оборудования и газопроводов, а также расстояния между зданиями и сооружениями, не являющиеся противопожарными.

В методике рассмотрено проведение численного эксперимента с помощью полевого моделирования динамики пожара. Предполагается, что моделирование выполняется с помощью специальной программы, программный код которой численно позволяет решать дифференциальные уравнения сохранения массы, энергии и импульса с учетом граничных условий, учитывающих влияние окружающего пространства.

Поскольку предполагается, что моделирование выполняется с помощью готовой программы, этап выбора численных методов и алгоритмов решения уравнения в настоящей методике не рассматривается, как и проведение соответствующих процедур верификации и валидации.

Основной задачей методики является организация численного эксперимента при помощи разработки алгоритмических процедур работы с компьютерными моделями объектов на основе выявленных свойств.

Настоящей методикой следует руководствоваться при производстве экспертиз и исследований в системе государственных судебно-экспертных учреждений (подразделений) ФПС МЧС России, а также при обучении пожарно-технических экспертов и других специалистов в области пожарной безопасности.

1. Критерий распространения пожара между объектами

Для обеспечения пожарной безопасности противопожарные расстояния между зданиями, сооружениями должны обеспечивать нераспространение пожара на соседние здания, сооружения (ст. 69 Федерального закона от 22.07.2008 №123-ФЗ [1]).

Метод расчетного обоснования противопожарного расстояния основывается на определении величины падающего теплового потока излучения от пламени пожара в здании, сооружении, $q_{пад}$, на горючие материалы наружных конструкций соседнего объекта и на материалы, находящиеся за остеклением и проемами.

Полученные значения теплового потока сравниваются с его допустимыми значениями, превышение которых является необходимым условием для воспламенения рассматриваемых горючих материалов. В случае, если величина падающего теплового потока не превышает допустимое значение, делается вывод о невозможности воспламенения от излучения данного теплового потока горючих материалов объектов на рассматриваемом фактическом расстоянии (Приложение А к СП 4.13130.2013 [2], [6]).

В соответствии с вышеизложенным, основным критерием распространения пожара между объектами является превышение излучения расчетного теплового потока, воздействующего на облучаемый объект, допустимого значения.

Конечно же, существуют и другие источники теплового воздействия, обуславливающие зажигание объектов, расположенных на расстоянии друг относительно друга. Например, передача тепла искрами и горящими частицами, переносимыми в факеле пожара. Данные способы передачи тепла в обязательном порядке должны быть рассмотрены в ходе реконструкции пожара. При прогнозировании распространения пожара данное исследование избыточное, т.к. при определенных условиях практически в каждом случае

искры могут с угрозу распространения пожара, в том числе на расстояниях, значительно превышающих нормативные.

Величина падающего теплового потока излучения зависит от мощности очага пожара и площади поверхности пламени, обращенной к облучаемому объекту. Важным этапом проведения моделирования является формулирование сценариев пожара, которые будут рассмотрены на объектах.

В расчетных сценариях при прогнозировании распространения пожара рассматривается реализация наихудших условий, определяемых наибольшей мощностью тепловыделения при пожаре и наибольшей интенсивностью теплового воздействия.

В сценариях при реконструкции пожара рассматриваются условия, установленные в материалах дела (по показаниям свидетелей, фото и видеоматериалам, данным метеостанций и т.д.).

2 Вопросы, поставленные на разрешение эксперту, касающиеся противопожарного расстояния между объектами

Перед экспертом могут быть поставлены следующие вопросы, касающиеся оценки распространения пожара между объектами:

1) *Соответствуют ли противопожарные расстояния между объектами требованиям пожарной безопасности?*

2) *Имеется ли причинно-следственная связь между нарушениями требований пожарной безопасности в виде сокращения противопожарного расстояния с развитием (распространением) пожара?*

3) *Имеется ли причинно-следственная связь между нарушениями требований пожарной безопасности в виде сокращения противопожарного расстояния с последствиями пожара?*

4) *Соответствует ли противопожарное расстояние между объектами требованиям пожарной безопасности при наличии какой-либо негорючей экранирующей конструкции (например, забора, стены, экрана) между ними?*

5) *Имеется ли угроза распространения пожара между объектами при несоответствии противопожарного расстояния между ними требованиям пожарной безопасности?*

6) *Создает ли сокращение противопожарного расстояния между объектами наличие опасных факторов пожара, которые могут привести к гибели людей?*

Соответственно, исходя из формулировок вопросов 1–3, целью расчета будет являться определение теплового потока, который мог быть реализован в момент происшествия с учетом обстоятельств пожара. При этом качественно необходимо также оценить воздействие факела на облучаемый объект с учетом содержащихся в нем разогретых или горящих частиц горючих материалов.

Формулировка вопросов 4–6 предполагает расчет теплового потока в условиях прогнозируемого пожара на каждом из объектов, расстояние между которыми сокращено. При этом рассматриваются наихудшие условия с точки зрения обеспечения пожарной безопасности объектов защиты.

Также необходимо уточнить, что для ответа на вопрос о влиянии опасных факторов на человека расчета теплового потока будет недостаточно, т.к. возможное превышение тепловым потоком критического значения опасно для здания (объекта), но не определяет наличие угрозы жизни и здоровью людей. В этом случае при превышении тепловым потоком критических значений существует вероятность возникновения пожара в соседнем здании. Для установления же наличия или отсутствия угрозы жизни и здоровью людей необходимо определить на объекте величину индивидуального пожарного риска [3, 4], в том числе с учетом имеющихся на объекте систем противопожарной защиты и их соответствии требованиям пожарной безопасности.

После анализа нормативной базы и определения необходимости проведения моделирования в первую очередь формируется ряд задач, в результате решения которых определяется набор конкретных физических величин или состояний исследуемой модели, определение которых необходимо для ответа на поставленный вопрос.

Например, для ответа на вопросы 1–3 будет необходимым выполнение следующих задач:

- 1) определить сценарии, в результате которых реализуются условия пожара, имевшие место быть в момент происшествия;
- 2) определить максимальные тепловые потоки, падающие на горючие материалы внешних конструкций соседнего объекта в результате возникшего на объекте пожара;
- 3) определить направление факела в период пожара с учетом силы и направления ветра. При этом учитывать как среднее значение ветра, так и его порывы;

4) сравнить расчетные тепловые потоки с допустимыми значениями интенсивности облучения для горючих материалов, входящих в состав внешних конструкций облучаемого объекта (соседнего здания), и оценить возможность распространения пожара между объектами посредством передачи тепла излучением;

5) оценить возможность распространения пожара между объектами посредством прямого воздействия горящих частиц на горючие материалы соседнего объекта.

Для ответа на вопросы 4–6 будет необходимо выполнение следующих задач:

1) определить сценарии, в результате которых реализуются наихудшие условия пожара;

2) определить максимальные тепловые потоки, падающие на горючие материалы внешних конструкций объектов при возникновении пожара на каждом из них;

3) сравнить расчетные тепловые потоки с допустимыми значениями интенсивности облучения для горючих материалов, входящих в состав внешних конструкций облучаемого объекта (соседнего здания), и оценить возможность распространения пожара между объектами посредством передачи тепла излучением.

Для ответа на вопрос 6 будет необходимо выполнение следующих задач:

1) определить сценарии, в результате которых реализуются наихудшие условия пожара;

2) определить максимальные тепловые потоки, падающие на горючие материалы внешних конструкций объектов при возникновении пожара на каждом из них;

3) сравнить расчетные тепловые потоки с допустимыми значениями интенсивности облучения для горючих материалов, входящих в состав внешних конструкций облучаемого объекта (соседнего здания), и оценить

возможность распространения пожара между объектами посредством передачи тепла излучением;

4) рассчитать величину пожарного риска и оценить возможность реализации пожарной опасности объекта защиты и ее последствий для людей и материальных ценностей.

После установления перечня решаемых задач формулируется соответствующая физическая задача (область расчета с начальными и граничными условиями) и ее математическая модель, определяется программный комплекс(ы), обеспечивающий ее реализацию.

Выбор программного комплекса для оценки теплового потока производится специалистом, производящим расчет, с учетом:

- возможности реализации математической модели;
- возможности задания необходимого массива исходных данных;
- наличия у программы пройденных процедур верификации и валидации. При этом валидация, по возможности, должна содержать результаты тестовых задач, аналогичных решаемым.

- возможности моделирования горения в окружающей среде с изменяющимися климатическими условиями.

Для полевого моделирования динамики пожара с учетом изменяющихся климатических параметров внешней среды могут быть использованы программные продукты, которые прошли соответствующую верификацию и валидацию. Примерами таких программ могут быть построенные на основе кода FDS программные комплексы, доступные для покупки в России, такие как PyroSim, (ИП Карькин И.Н., г. Екатеринбург), Fenix (АО «Современные программные технологии», г. Нижний Новгород), а также программный комплекс СИГМА ПБ (ООО ЗК-Эксперт», к. Красноярск), содержащий в себе полностью отечественный код. Также могут применяться FireFOAM, PHOENICS/FLAIR, Ansys - FLUENT, KAMELEON FireEx, STAR-CD, Fire-3D, ЛОГОС, и другие.

Далее приведен алгоритм построения численного эксперимента для моделирования динамики распространения пожара между объектами с учетом особенностей исследования в рамках производства пожарно-технических экспертиз по произошедшему и прогнозируемому пожарам.

3 Алгоритм проведения численного эксперимента

На рисунке 1 схематично приведен алгоритм проведения численного эксперимента.



Рисунок 1 – Алгоритм численного эксперимента при ответе на вопрос о возможности распространении пожара между объектами

3.1 Анализ рассматриваемого объекта и соседних зданий и сооружений. Определение необходимых для моделирования массива исходных данных

Для каждого из рассматриваемых объектов производится анализ исходных данных, определяющих их пожарную опасность и значение критериев распространения пожара между ними.

Массив исходных данных для каждого объекта должен включать:

- генеральный план;
- фактические расстояния между объектами;
- нормативные противопожарные расстояния;
- сведения о высоте, этажности, степени огнестойкости, классе функциональной и конструктивной пожарной опасности;
- объемно-планировочные решения с информацией о функциональном назначении помещений, расположении пожарных отсеков, частей зданий или помещений, выделенных противопожарными преградами;
- конструктивные решения ограждающих конструкций объектов, включая данные о показателях пожарной опасности материалов наружных стен, окон, кровли, фасадных систем, наружной (при наличии) отделки и облицовки;
- наличие систем противопожарной защиты и их состояние (исправное, работоспособное) на объекте.

В случае проведения экспертизы по произошедшему пожару дополнительно необходима следующая информация:

- справка о климатических условиях по состоянию на момент пожара;
- данные о состоянии оконных, дверных и иных проемов в период развития пожара (фото-, видеоматериалы, показания свидетелей);
- вещная обстановка на момент начала пожара;
- время прибытия пожарных подразделений;
- другая информация, необходимая для реконструкции пожара.

3.2 Определение сценариев пожара

Общий принцип выбора сценария прогнозируемого пожара следующий: аварийная ситуация всегда должна рассматривать наихудшие условия по воздействию на человека или имущество опасных факторов пожара и наилучшие условия по развитию пожара, если не требуется иного, конкретного для данного объекта, построения хода численного эксперимента, как, например, в случае построения сценария по произошедшему пожару.

В сценариях должны быть рассмотрены:

- пожар на каждом из рассматриваемых объектов при наибольшей возможной температуре окружающей среды;
- выброс пламени через проемы в ограждающих конструкциях, стенах;
- влияние климатических особенностей местности.

Принцип выбора сценария произошедшего пожара определяется установленным и описанным механизмом развития горения.

Для учета влияния скорости ветра на наклон факела в сторону облучаемого объекта, и как следствие на увеличение теплового воздействия, в условиях прогнозируемого пожара, проводится моделирование нескольких сценариев пожара с различными скоростями ветра. Допускается принимать скорость ветра, равную 5 м/с.

3.3 Построение математической модели

Численное пространство, разбитое на ячейки расчетной трехмерной сеткой, в которое погружены объекты исследования, называется расчетной областью. Внутри расчетной области строится математическая модель объектов защиты. Пример математической модели объектов защиты приведен на рисунках 2 и 3.

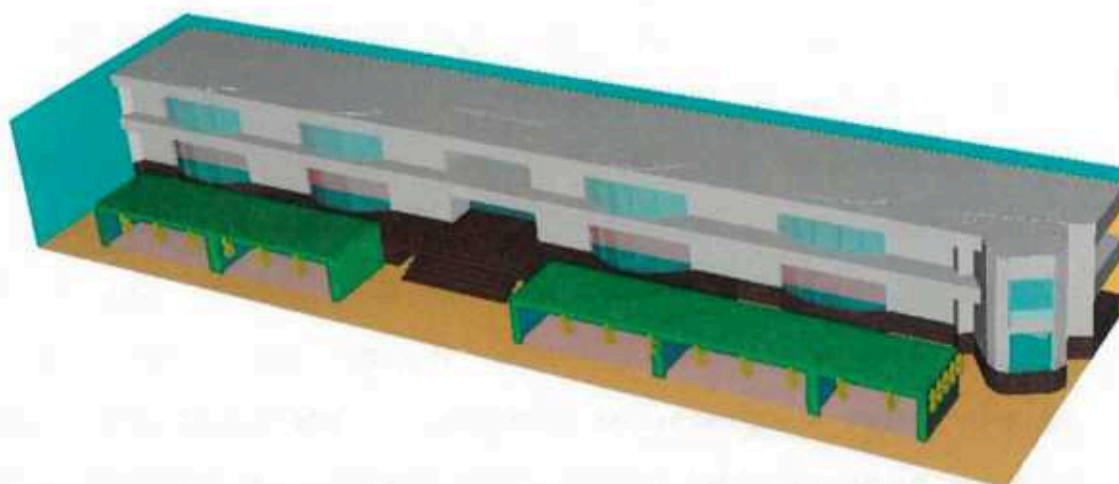


Рисунок 2 – Математическая модель объектов исследования

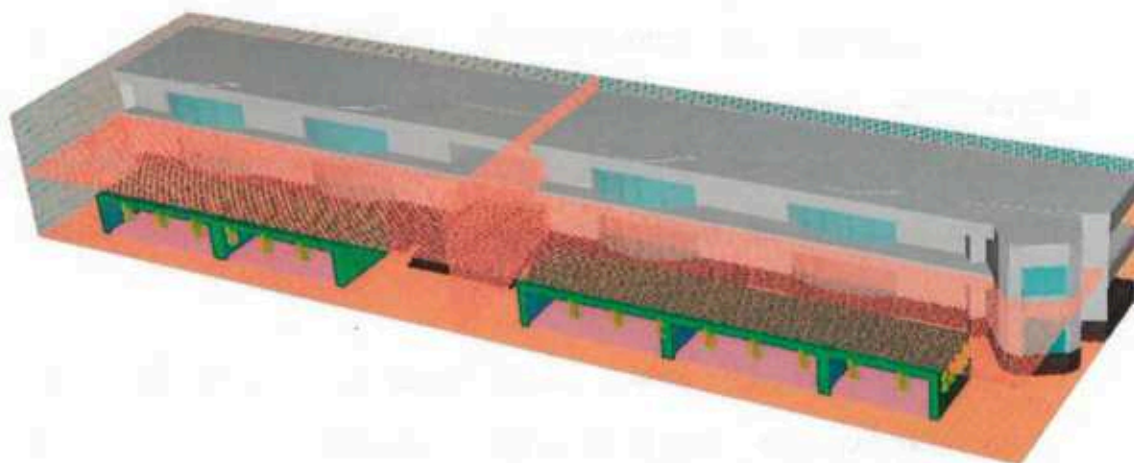


Рисунок 3 – Математическая модель объектов исследования
с визуализированной расчетной сеткой

При построении математической модели объекта необходимо руководствоваться следующими основными принципами:

1. Свободные границы расчетной области необходимо максимально удалять от очага пожара.

2. Ограждающие конструкции объектов рекомендуется задавать с учетом реальных свойств материалов, без использования таких стандартных граничных условий, как инертность и адиабатичность, что позволит получать более точные результаты расчета. Например, материалом для ограждающих конструкций может быть кирпич, бетон или др. Если цель

исследования не включает расчет прогрева конструкций (в большинстве случаев это так), то толщина конструкций не имеет значения.

3. Состояние проемов в ограждающих конструкциях, перегородках и перекрытиях влияет на газообмен внутри помещения очага пожара и определяет мощность тепловыделения при пожаре. Для моделирования распространения прогнозируемого пожара мощность тепловыделения должна иметь максимальное значение, в том числе для моделирования выброса пламени через проемы. Это достигается заданием в помещении очага пожара достаточного количества открытых проемов, через которые в помещение очага поступает воздух.

4. Разрешающая способность расчетной сетки должна быть достаточной для выполнения условия нечувствительности получаемых результатов к размеру ячейки. Другими словами, получаемые результаты расчетов должны не меняться несмотря на уменьшение размеров ячейки сетки.

Кроме этого, при использовании моделей турбулентности с моделированием турбулентных вихрей (например, LES, VLES) разрешающая способность расчетной сетки должна быть достаточной для отображения пульсаций и размеров турбулентных вихрей.

Существуют зависимости для выбора размера ячейки расчетной сетки, зависящие от используемой программы и вида расчетной сетки (структурированные, неструктурированные, адаптивные).

Например, для структурированной прямоугольной сетки должно выполняться соотношение [7]:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{T \cdot \rho \cdot c \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \longrightarrow 4 < \frac{D^*}{\Delta x} < 16,$$

где D^* – характерный диаметр очага пожара, м,

\dot{Q} – мощность очага, кВт,

T – температура среды, К,

ρ – плотность среды, кг/м³,

c – удельная теплоемкость среды, кДж/кгК,

g – ускорение свободного падения, м/с²,

Δx – линейный размер ячейки сетки, м.

Допустимо задавать несколько сеток: мелкая, например 0,01 м – в области очага пожара, более грубая (более крупная) – за очагом пожара на некотором удалении, например, с размером ячеек равным 0,25 м. Причем переход от мелкой сетки к более грубой должен быть плавным: следующая ячейка не должна отличаться от предыдущей более чем в два раза.

Многочисленные исследования показали, что достаточный адекватный уровень получаемых результатов достигается в использовании высокого разрешения расчетной сетки, при котором размер ячеек не превышает 0,05 м.

5. Поверхность горения, мощность очага и продолжительность моделирования должны быть такими, чтобы обеспечивался выброс пламени через проемы в ограждающих конструкциях.

Выбор вида горючей нагрузки должен соответствовать классу функциональной пожарной опасности помещения или здания. Данные по типовой горючей нагрузки приведены в [3,13]. Недопустимо изменять величины, указанные в данных таблицах в меньшую сторону, за исключением случаев, когда помещение оборудовано автоматической установкой пожаротушения, соответствующей требованиям нормативных документов по пожарной безопасности. В этом случае массовая скорость выгорания горючей нагрузки может быть уменьшена в 2 раза.

Максимальную площадь горения для помещений классов функциональной пожарной опасности Ф1–Ф4 следует принимать равной двум площадям помещения очага, для помещений класса Ф5.2 с высотой хранения менее 5,5 м – равной четырем площадям помещения очага, для помещений класса Ф5.2 с высотой хранения более 5,5 м – равной

фактической площади поверхности горючих материалов (но не менее 10 площадей помещения).

Поскольку мощность очага пожара зависит от площади горения, то задание этой площади может быть выполнено одним из двух способов:

– объемной фигурой (на рисунке 4 пример в виде параллелепипеда), сумма сторон которой, кроме нижней, равна площади помещения, умноженной на соответствующий коэффициент.

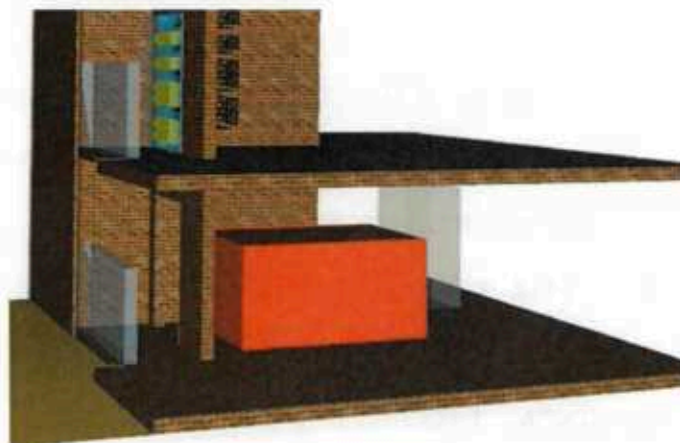


Рисунок 4 – Задание поверхности горения объемной фигурой

– плоскостью (рисунок 5), но массовая скорость выгорания должна быть умножена на соответствующий площади коэффициент.

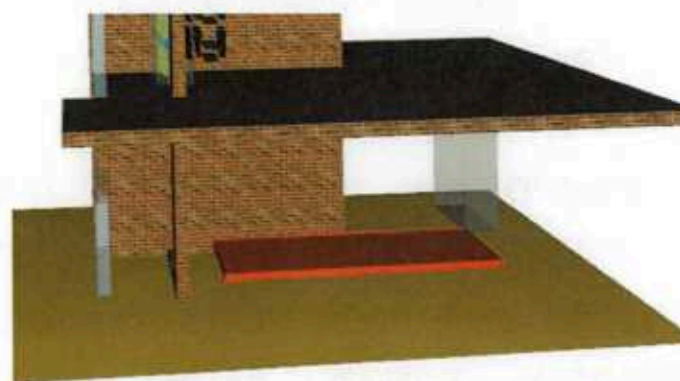


Рисунок 5 – Задание поверхности горения плоскостью

Также необходимо учитывать влияние на отклонение факела от фасада здания в сторону облучаемого объекта геометрических параметров проемов, через которые происходит выброс пламени.

На рисунке ниже содержится пояснение к определению отклонения факела от фасада здания.

В соответствии с [6], если ширина оконного проема, «а», умноженная на 1,25 меньше высоты проема, «h», то факел будет прижиматься к фасаду здания. Если же ширина оконного проема «а», умноженная на 1,25, больше высоты проема «h», то будет иметь место отклонение факела от фасада здания (рисунок 6).

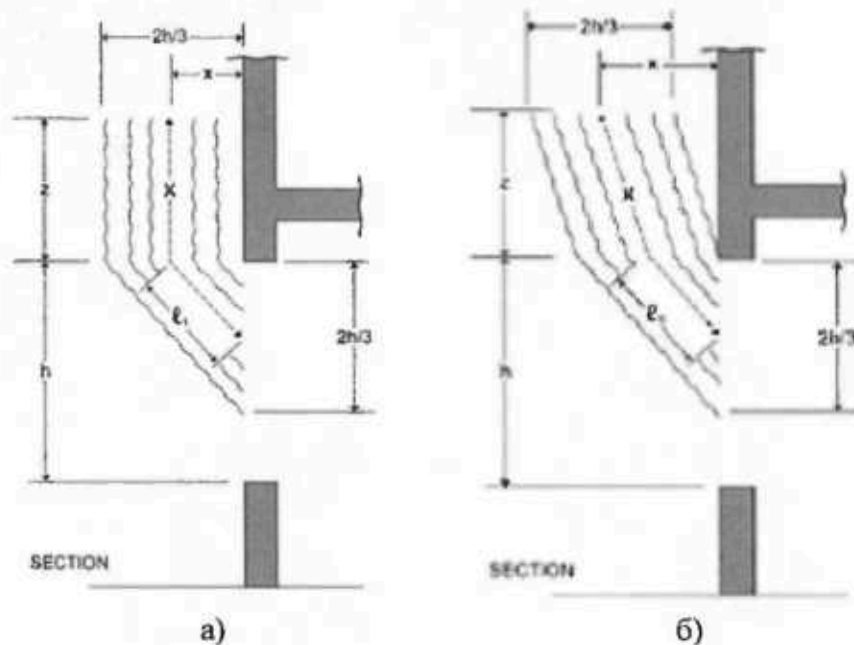


Рисунок 6 – Влияние геометрических параметров оконного проема на отклонение внешнего факела: а) $h > 1,25a$, б) $h < 1,25a$

Описанное выше поведение факела продемонстрировано на рисунке 7.

В качестве расчетных должны рассматриваться пожары в помещениях с максимальной суммарной площадью оконных проемов, обращенных к соседнему объекту. Принимается, что пожар охватывает все помещения на этаже [2]. Если части этажа или помещения выделены противопожарными стенами или перегородками (например, межсекционными или межквартирными), допускается принимать, что пожар развивается только в пределах указанных преград.

Допускается не рассматривать сценарии пожара в коридорах, лифтовых холлах, тамбурах, лестничных клетках, выделенных противопожарными преградами в соответствии с требованиями нормативных документов, а также при отсутствии в них горючей нагрузки.

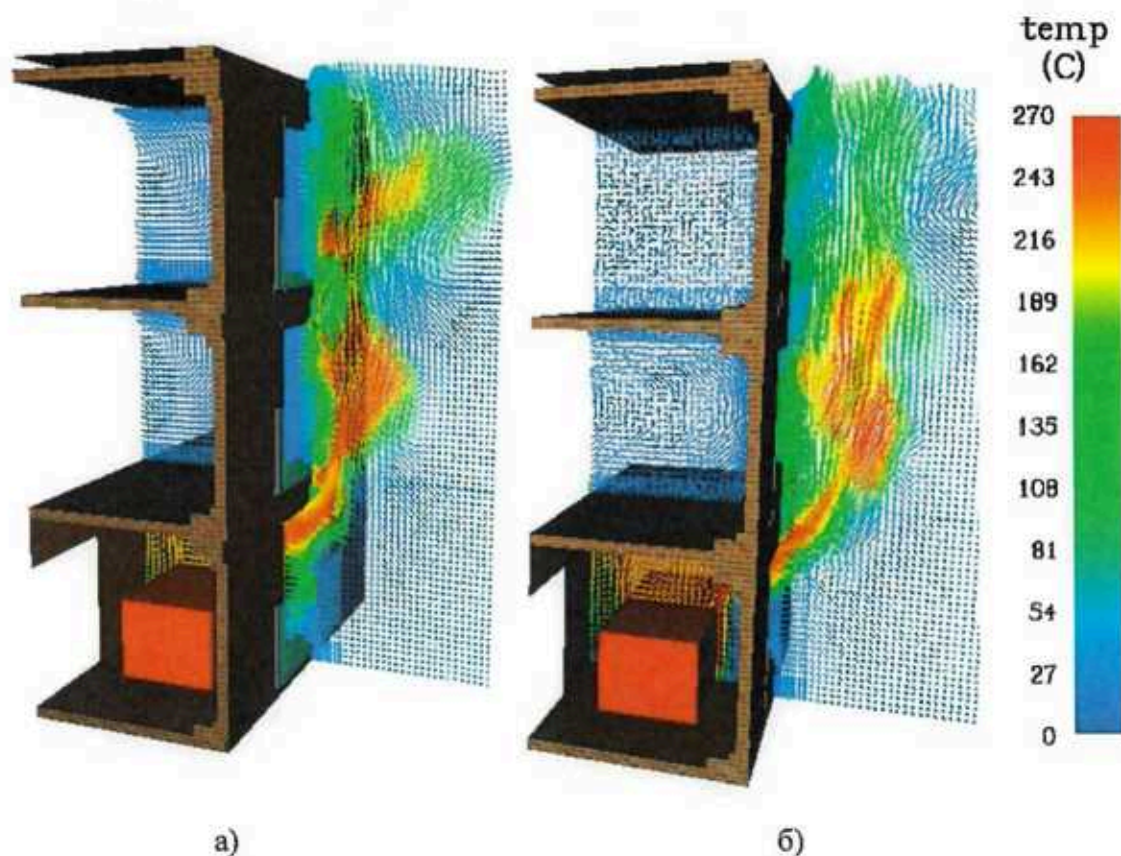


Рисунок 7 – Изменение формы факела в зависимости от высоты и ширины оконного проема: а) $h > 1,25a$, б) $h < 1,25a$

Для стен с оконными проемами без междуэтажных поясов или с поясами шириной менее 1,2 м, необходимо проанализировать эффективность фактической ширины и конструкции междуэтажного пояса с точки зрения ограничения распространения пожара. При неэффективности пояса рассматривается пожар на всех этажах здания.

При рассмотрении расстояний между объектами 6 м и менее, в случае со зданиями с негорючими ограждающими конструкциями без проемов следует руководствоваться следующим:

– при пределе огнестойкости конструкции $30 \leq EI < 150$ формально задается квадратный проем в конструкции, обращенной к соседнему зданию в месте минимального противопожарного расстояния, размером 5 % от площади ограждающей конструкции в пределах пожарной секции для зданий класса функциональной пожарной опасности Ф1–Ф4; 10 % от площади ограждающей конструкции в пределах пожарной секции для зданий класса функциональной пожарной опасности Ф5;

– при пределе огнестойкости конструкции $15 \leq EI < 30$ формально задается квадратный проем в конструкции, обращенной к соседнему зданию в месте минимального противопожарного расстояния, размером 10% от площади ограждающей конструкции в пределах секции для зданий класса функциональной пожарной опасности Ф1–Ф4; 25% от площади ограждающей конструкции в пределах секции для зданий класса функциональной пожарной опасности Ф5.

Для зданий и сооружений IV степени огнестойкости класса С2–С3 и V степени огнестойкости в качестве расчетного сценария пожара, независимо от фактической горючести материалов, должен приниматься охват пламенем всех наружных сторон и кровли по всей площади.

Все проемы, через которые предполагается воздействие пламени на соседний объект, задаются открытыми с момента начала расчета.

Примеры моделей сценариев с площадью пожара, равной этажу здания, и площадью, равной суммарной площади поверхности сторон объекта, показаны на рисунке 8.

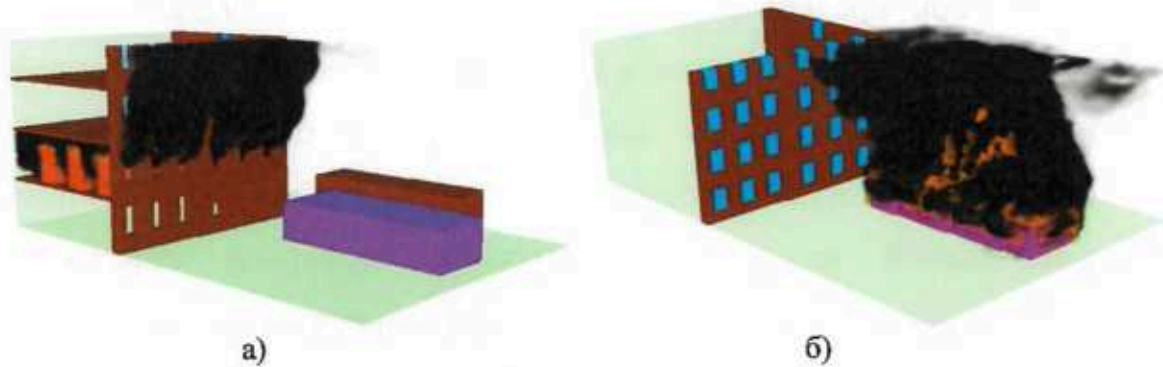


Рисунок 8 – Сценарии развития пожара:

- а) воздействие пламени через проемы на этаже пожара;
- б) охват пламенем всех поверхностей объекта V степени огнестойкости

6. Расстановка расчетных точек. Для каждого горючего материала поверхности наружных конструкций соседнего здания, сооружения (стен, фасадных систем, материала заполнения проемов, наружной отделки и облицовки, кровельного покрытия и т.п.), которые могут подвергнуться тепловому воздействию от расчетного пожара, определяется критическая плотность теплового потока $q_{\text{крит}}$, при которой возможно его воспламенение. При комбинации материалов с различными значениями $q_{\text{крит}}$ расчет ведется по материалу с наименьшим значением.

Соответственно, контрольные точки, в которых определяется тепловой поток, должны попасть в области расположения перечисленных выше горючих материалов.

При размещении контрольных точек, в том числе в случае расстояния 6 м и менее между объектами, следует также руководствоваться предполагаемым расположением области максимального теплового воздействия. Как правило, данная область находится на высоте половины высоты факела (рисунок 9).

В каждом из рассматриваемых случаев помимо регистрации падающего теплового потока датчиками, необходимо также сохранять поля падающего теплового потока на все твердые поверхности.

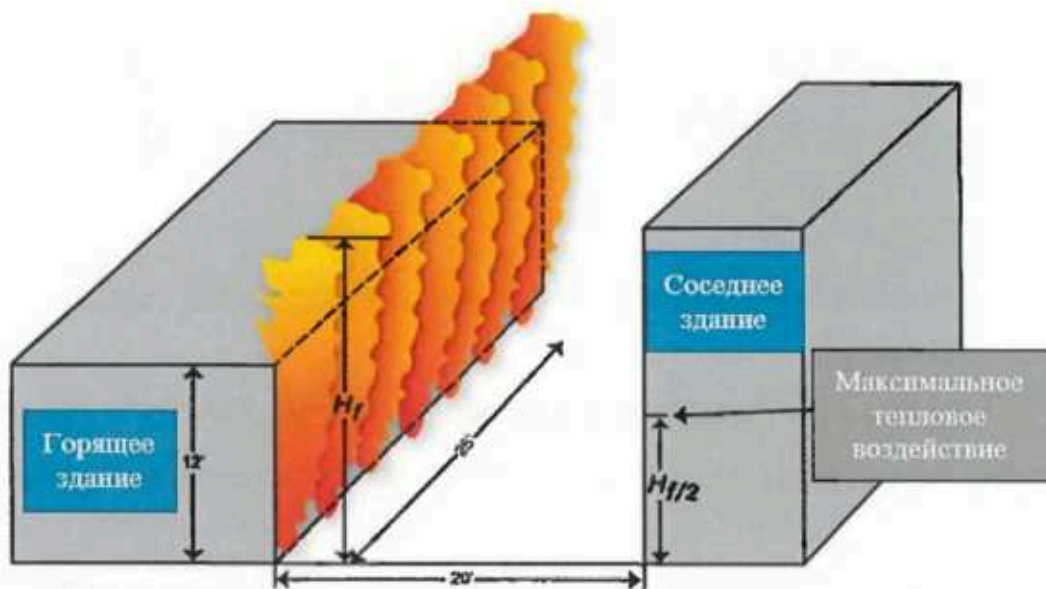


Рисунок 9 – Расположение области максимального теплового воздействия

На рисунках 10, 11 представлен пример размещения контрольных точек (желтые точки) падающего теплового потока при моделировании распространения пожара между объектами, расположенными на расстоянии 5 м друг относительно друга.

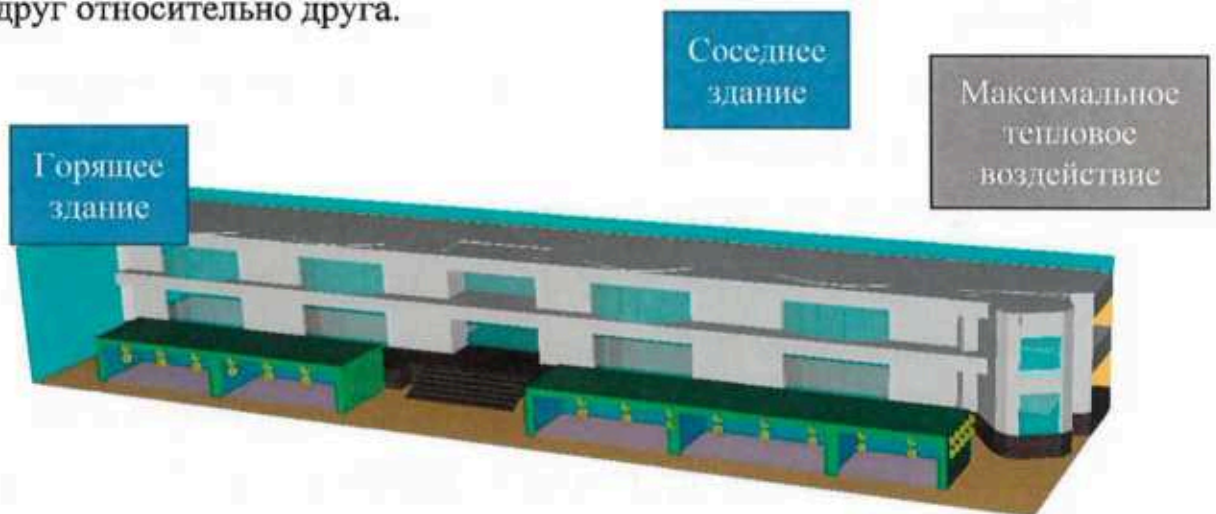


Рисунок 10 – Размещение контрольных точек в области расположения оконных проемов с горючими материалами

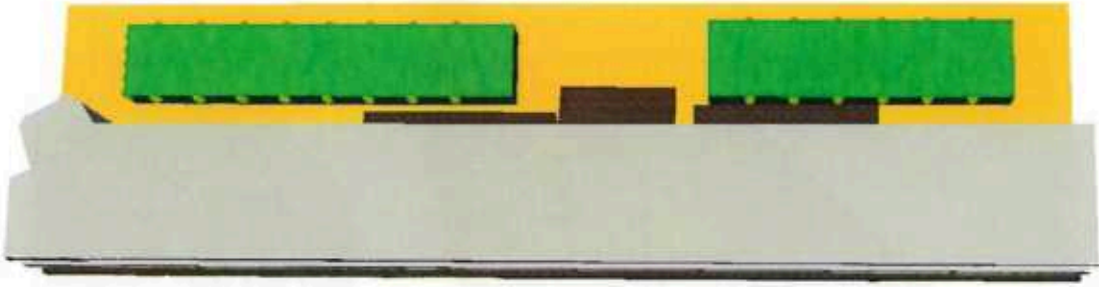


Рисунок 11 – Размещение контрольных точек в области воздействия теплового потока на глухих конструкциях с пределом огнестойкости EI15

7. **Время расчета.** В случае прогнозирования распространения пожара время расчета (время моделирования) определяется выходом мощности, а значит и величины теплового потока на соседний объект на максимальное значение. В расчетах, как правило, не рассматривается прогрев конструкций, выгорание горючей нагрузки, развитие пожара от момента инициирования горения, не учитывается деятельность пожарных подразделений. **Следовательно, время моделирования, как правило, устанавливается экспертом (специалистом) самостоятельно. Причем достаточным будет время моделирования 120 с, 200 с и т.д.**

Допускается устанавливать другое время моделирования, в случае необходимости расчета прогрева конструкции и в случае ограниченного количества топлива при соответствующем дополнительном обосновании.

8. **Величины критических потоков, $q_{\text{крит}}$, для воспламенения некоторых горючих материалов** приведены в таблицах 1 и 2. Допускается также использование справочных данных, результатов испытаний или экспериментальных исследований, опубликованных в научно-технической литературе по пожарной безопасности. При отсутствии данных для горючего материала допускается принимать величину критического потока, равную $q_{\text{крит}} 8 \text{ кВт/м}^2$.

Воздействие теплового излучения на горючие материалы, находящиеся за остекленными оконными проемами, при расчете допускается учитывать как воздействие на проем, заполненный материалом с $q_{\text{крит}} = 15 \text{ кВт/м}^2$.

При проведении расчетов на расстояниях между объектами 6 м и менее используются следующие критерии оценки допустимости противопожарного расстояния:

– для облучаемого здания с горючими ограждающими конструкциями или проемами, не имеющими противопожарного заполнения: $q_{\text{крит}} = 12,5 \text{ кВт/м}^2$;

– для облучаемого здания с металлическими ограждающими конструкциями или негорючими конструкциями с пределом огнестойкости менее EI 15, а также проемами с огнестойким остеклением: $q_{\text{крит}} = 20 \text{ кВт/м}^2$;

– для облучаемого здания с негорючими конструкциями с пределом огнестойкости не менее EI 15 необходимо производить расчет прогрева ограждающих конструкций и оценку их огнестойкости с учетом фактического теплового воздействия. Допускается принимать $q_{\text{крит}} = 20 \text{ кВт/м}^2$.

Таблица 1 – Величины $q_{крит}$ для воспламенения некоторых горючих материалов [8]

Материалы	$q_{крит}$, кВт • м ⁻²
Древесина (сосна влажностью 12 %) .	13,9
Древесно-стружечные плиты (плотностью 417 кг • м ⁻³)	8,3
Торф брикетный	13,2
Торф кусковой	9,8
Хлопок-волокно	7,5
Слоистый пластик	15,4
Стеклопластик	15,3
Пергамин	17,4
Резина	14,8
Уголь	35,0
Рулонная кровля	17,4
Картон серый	10,8
Декоративный бумажно-слоистый пластик	19,0-24,0
Металлопласт	24,0-27,0
Плита древесно-волокнистая	13,0
Плита древесно-стружечная	12,0
Плита древесно-стружечная с отделкой «Полишлен»	12,0
Плита древесно-волокнистая с лакокрасочным покрытием под ценные породы дерева	12,0-16,0
Винилискожа обивочная пониженной горючести	30,0-32,0
Кожа искусственная	17,9-20,0
Стеклопластик на полиэфирной основе	14,0
Лакокрасочные покрытия	25,0
Обои моющиеся ПВХ на бумажной основе	12,0
Линолеум ПВХ	10,0-12,0
Линолеум алкидный	10,0
Линолеум ПВХ на тканевой основе	6,0-12,0
Покрытие ковровое	4,0-6,0
Сено, солома (при минимальной влажности до 8 %)	7,0
Легковоспламеняющиеся, горючие и трудногорючие жидкости при температуре самовоспламенения, °С:	
300	12,1
350	15,5
400	19,9
500 и выше	28,0 и выше

Таблица 2 – Измеренные характеристики зажигания твердых горючих материалов и распространения пламени по их поверхности [9, 10, 11].

Горючий материал	$\lambda\rho C$, (кВт ² ·с)/ (К ² ·м ⁴)	Зажигание		Распространение пламени		
		T_{ign} , °С	q_{cr} , кВт/м ²	$T_{0,min}$, °С	Φ , кВт ² /м ³	$\Phi/(\lambda\rho C)$, м·К ² /с
ПММА 1.59 мм	0.73	278	9	120	5.4	8
ПММА 12.7 мм	1.02	378	15	90	14.4	14
Ковер (акрил)	0.42	300	10	165	9.9	24
Ковер (нейлон, шерсть)	0.68	412	18	265	11.1	16
Ковер (необработанная шерсть)	0.25	435	20	335	7.3	30
Ковер (обработанная шерсть)	0.24	455	22	365	0.8	4
ДВП 3.175 мм	0.88	365	14	40	10.9	12
ДВП 6.35 мм	1.87	298	10	170	4.5	2
ДВП (hardboard S159M)	–	372	18	80	–	18
ДВП (гляцевая окраска) 3.4 мм	1.22	400	17	320	3.5	3
ДВП (нитрокраска)	0.79	400	12	180	9.8	12
Рубероидная кровельная плитка	0.70	378	15	140	5.3	8
Кровельное стекловолокно	0.50	445	21	415	9	18
ДСП (ель) 12.7 мм	0.94	382	14	210	12.7	14
ДСП 12.7 мм	0.93	412	18	275	4.2	5
Деревянная панель	–	385	–	155	–	43
Фанера 6.35 мм	0.46	390	16	170	7.4	16
Фанера 12.7 мм	0.54	390	16	120	12.9	24
Фанера (огнезащитная обработка) 12.7 мм	0.76	620	44	620	–	–
Картон легкий	–	330	–	90	–	42
Картон изоляционный	0.46	355	–	210	2.2	5
Картон (chipboard S118M)	–	390	–	180	–	11
Пена мягкая 25.4 мм	0.32	390	16	120	9.9	31
Пена жесткая 25.4 мм	0.03	435	20	215	4.0	141
Стеклопластик 1.14 мм	0.72	400	17	365	4.2	6
Стеклопластик 2.24 мм	0.32	390	16	80	9.9	31
Полиизоцианурит 50.8 мм	0.02	445	21	275	4.9	201
Эпоксидная отделочная панель (салон самолета)	0.24	505	28	505	–	–
Сухая штукатурка, обои	0.57	412	18	240	0.79	1
Сухая штукатурка, 12.7 мм	0.40	510	28	300	9.2	23
Сухая штукатурка (огнезащитная обработка) 12.7 мм	0.45	565	35	425	14.4	32
Поликарбонат 1.52 мм	1.16	528	30	455	14.7	13
Полиуретан	–	280	–	105	–	82
Полистирол 50.8 мм	0.38	630	46	–	–	–

В случае необходимости расчета прогрева конструкции, основным критерием потери несущей способности является достижение на необогреваемой поверхности критической температуры. Некоторые данные о значениях критических температур строительных материалов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Критическая температура для некоторых строительных материалов [8]

Материал	Критическая температура, °С
Сталь марок Ст3, Ст5 в стальных конструкциях; арматурные стали классов: А-I, А-II, А-IV, Am-IV, А-V, Am-V	500
Арматурная сталь классов: А-III Am-VI, Am-VII, В-I, Вр-I	600 450
Высокопрочная арматурная проволока классов В-II, Вр-11 и арматурные канаты класса К-7	400
Сталь марок Ст3, Ст5 при жестком закреплении стальных конструкций и для металлических каркасов	300
Конструкции из алюминиевых сплавов	250
Гранит	700
Известняк	800
Тяжелый бетон с заполнителем	600
Тяжелый бетон с известняковым заполнителем	675
Кирпич глиняный обыкновенный	900
Силикатный кирпич	700

9. При исследовании распространения пожара между объектами в сценариях необходимо рассчитывать именно значение падающего теплового потока, не поглощаемого поверхностью. Данные значения необходимо сравнивать с критическими ($q_{крит.}$), согласно табл. 1.

Допускается также использование иных официально опубликованных справочных данных, полученных для продолжительности теплового облучения материала не менее 15 мин. При неизвестной продолжительности облучения справочное значение критической плотности теплового потока должно применяться с коэффициентом безопасности. При этом сравнение

производится уже по допустимому тепловому потоку, $q_{\text{доп}}$, рассчитываемому по формуле:

$$q_{\text{доп}} = 0,8 \cdot q_{\text{крит}}, \text{ кВт/м}^2$$

10. При проведении расчета распространения прогнозируемого пожара необходимо рассмотреть в сценарии отсутствие и наличие ветра. Направление ветра определяется расположением облучаемого объекта, т.е. ветер направлен в сторону облучаемого объекта. Для полноценного учета влияния ветра на форму и длину факела необходимо рассмотреть несколько значений силы ветра и выбрать наибольшее его влияние, при котором наклон факела и уровень теплового воздействия максимальны.

По данным [12] скорость ветра оказывает существенное влияние на относительную длину пламени в пределах его значений от 0 до 3,85 м/с. При дальнейшем увеличении скорости ветра длина пламени остается постоянной. Отклонение пламени от вертикальной оси при штиле составляет 0–15° и достигает 60–70° при скорости ветра 4,8 м/с. Расчет допускается выполнять при выборе скорости ветра в сторону облучаемого объекта – 5 м/с.

3.4 Анализ результатов моделирования. Оценка погрешности

Если для всех рассмотренных объектов (для всех облучаемых материалов наружных конструкций) во всех сценариях пожара выполняется условие для падающего теплового потока $q_{\text{пад}} < q_{\text{крит}}$, то можно заключить:

- отсутствует угроза распространения пожара между объектами;
- сокращение противопожарного расстояния между объектами до фактического значения можно считать допустимым и обоснованным.

Если указанное условие не соблюдается для хотя бы одного материала, то делается вывод о наличии угрозы распространения пожара между объектами и о недопустимости сокращения противопожарного расстояния между ними.

При внедрении результатов, полученное расстояние необходимо проверить на предмет соответствия требованиям, предъявляемым к параметрам проездов, подъездов для пожарных автомобилей с рассматриваемых сторон зданий, а также требованиям строительных, санитарных и экологических норм.

Кроме этого, известно, что любые результаты численных расчетов содержат определенную погрешность. Величина погрешности зависит как от применяемых моделей физических явлений (например, турбулентности или горения, сажеобразования, срабатывания извещателей и др.), так и от входных параметров, описывающих окружающее пространство (например, материала ограждающих конструкций, мебели и т.д.). Согласно [7] разработчики программы FDS оценивают погрешность вычислений на своем коде в 10–20 % (погрешность, связанная с исходными данными).

Следовательно, можно полагать, что результаты корректно выполненных вычислений имеют погрешность около 20 %.

В этой связи полученное в результате моделирования значение падающего теплового потока необходимо увеличить на 20 % для учета погрешности вычисления. Таким образом, итоговое расчетное значение будет следующим:

$$q_{\text{расч}} = 1,2q_{\text{пад}}$$

3.5 Разработка дополнительных мероприятий по предотвращению распространения пожара

Для снижения величины $q_{\text{крит}}$ допускается применение конструктивных и технических (водяное орошение) способов огнезащиты, регламентируемых нормативными документами. Для снижения величины падающего теплового потока на конструкции допускается применение противопожарных экранов, штор, а также водяных завес, при этом значение потока умножается на коэффициент ослабления излучения завесой (отношение выходящего потока $q_{\text{вых}}$ к падающему $q_{\text{пад}}$). Значение указанного коэффициента для

конкретного экрана, шторы или завесы должно подтверждаться результатами расчетов, исследований или испытаний в соответствии с п. 5 ч. 1 ст. 6 [1]. При применении противопожарных водяных завес с параметрами по СП 485.1311500, предусмотренными для защиты технологических проемов, значение падающего теплового потока на защищаемую конструкцию допускается уменьшить на 25 %.

Если дополнительными мероприятиями предусмотрена противопожарная преграда, что необходимо оценить ее эффективность в сценариях пожара, построенных по алгоритму, описанному выше. Из расчетов определяются геометрические параметры преграды (высота, протяженность). При этом предел огнестойкости указанных преград должен быть не менее пределов огнестойкости конструкций рассмотренных объектов.

3.6 Требования к оформлению отчета по результатам проведенного моделирования пожара

Проведенные численные эксперименты по распространению пожара между объектами оформляется в виде отчета с титульным листом (установленного образца в случае проведения экспертизы), состоящего из следующих разделов:

- наименование и адрес объектов защиты;
- анализ рассматриваемого объекта и соседних зданий и сооружений;
- описание методики расчета, математической модели объектов;
- значения расчетных величин падающего теплового потока; анализ результатов моделирования;
- вывод о наличии/отсутствии угрозы распространения пожара *либо* вывод о допустимости сокращения противопожарного расстояния;
- приложения.

На титульном листе указываются наименования и адреса объектов защиты, в отношении которых производился расчет по оценке допустимости сокращения противопожарного расстояния (далее – расчет), проставляется гриф

согласования отчета по результатам расчета по оценке допустимости сокращения противопожарного расстояния (далее – отчет) заказчиком и утверждения отчета лицом, производившим расчет (включая подписи с расшифровкой, печати (при наличии) и даты согласования и утверждения отчета), списка исполнителей расчета (с подписями).

Раздел «Наименование и адрес объекта защиты» должен содержать наименование и адрес объекта (адрес расположения предприятия, частью которого является объект защиты), а также вводную часть, в которой указываются ссылки на нормативные правовые акты, нормативные и иные документы, источники получения информации, использованные при проведении расчета. Данный раздел также может содержать иную информацию, которую исполнитель расчета считает целесообразным указать.

Раздел «Анализ рассматриваемого объекта и соседних зданий и сооружений» содержит описание объектов, включая массив исходных данных для каждого объекта, включающий:

- генеральный план;
- фактические расстояния между объектами;
- нормативные противопожарные расстояния;
- сведения о высоте, этажности, степени огнестойкости, классе функциональной и конструктивной пожарной опасности;
- объемно-планировочные решения с информацией о функциональном назначении помещений, расположении пожарных отсеков, частей зданий или помещений, выделенных противопожарными преградами;
- конструктивные решения ограждающих конструкций объектов, включая данные о показателях пожарной опасности материалов наружных стен, окон, кровли, фасадных систем, наружной (при наличии) отделки и облицовки;
- наличие систем противопожарной защиты и их состояние (исправное, работоспособное) на объекте.

В случае проведения экспертизы по произошедшему пожару дополнительно приводится следующая информация:

- справка о климатических условиях по состоянию на момент пожара;

- данные о состоянии оконных, дверных и иных проемов в период развития пожара (фото-, видеоматериалы, показания свидетелей);
- вещная обстановка в момент пожара;
- время прибытия пожарных подразделений;
- донесение о пожаре;
- и другая информация, необходимая для реконструкции пожара.

В данном разделе также приводится перечень рассматриваемых сценариев развития пожара, сформулированных на основе проведенного анализа. В сценариях указывается принятый тип горючей нагрузки, время моделирования, скорость ветра, размер ячейки расчетной сетки, 3-х мерная визуализация расстановки датчиков теплового потока.

Раздел «Описание методики расчета» содержит основные уравнения, решаемые в ходе моделирования. Описание используемых моделей горения, излучения, турбулентности, сопряженного теплообмена, расчетных методов.

Раздел «Описание математической модели объектов» должен содержать визуализацию построенной в программе области моделирования, с включенными в нее объектами исследования, с указанием граничных условий, расположения области горения и датчиков, регистрирующих тепловой поток.

Раздел «Значения расчетных величин падающего теплового потока» должен содержать: 3-х мерную визуализацию сценариев пожара с демонстрацией формы и длины факела, поля падающего теплового потока на все твердые поверхности в модели, графические и табличные значения показаний датчиков тепловых потоков, графические или табличные значения мощности тепловыделения при пожаре.

Раздел «Анализ результатов моделирования» должен содержать в табличной форме информацию по всем рассмотренным сценариям, включающую в себя:

- расположение датчиков теплового потока;
- расчетное значение падающего теплового потока;
- допустимое значение падающего теплового потока;

- оценка выполнения условия $Q_{расч} < Q_{крит}$ или $Q_{расч} < Q_{доп}$.

Раздел «Вывод о наличии/отсутствии угрозы распространения пожара либо вывод о допустимости сокращения противопожарного расстояния» содержит выводы о том, имеется ли угроза распространения пожара между объектами, расположенными на данном расстоянии друг относительно друга, допустимо ли сокращение противопожарного расстояния между объектами до рассмотренного расстояния;

В разделе «Приложения» указываются:

- поэтажные планы, вертикальные разрезы объектов;
- документы, подтверждающие наличие на объектах защиты систем противопожарной защиты и их соответствие требованиям нормативных документов по пожарной безопасности (для эксплуатируемых объектов).

В качестве таких документов могут использоваться:

- техническое задание на проведение расчета;
- декларация пожарной безопасности;
- акт обследования объекта защиты или отдельных систем противопожарной защиты, заверенный подписями специалистов, производивших обследование, подписью руководителя организации и печатью организации;
- заключение о проведении независимой оценки пожарного риска.

В настоящем разделе по усмотрению лица, производящего расчет, может быть приведена иная информация

Список использованных источников

1. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. СП 4.13130.2013 «Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям (с изменениями № 1-4)». Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. Приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 «Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности». Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
4. Приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533 «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах». Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
5. Методология судебной пожарно-технической экспертизы: основные принципы. М.: ФГБУ ВНИИПО, 2013. 23 с.
6. Daniel J. O'Connor. The Building Envelope: Fire Spread, Construction Features and Loss Examples// SFPE Engineering Guide. Fire Risk Assessment. Society of Fire Protection Engineers (SFPE), Bethesda, MD, USA. 2016. pp 3242–3282.
7. Fire Dynamics Simulator. Users Guide / K. McGrattan [et al.]. NIST Special Publication 1019, 2020. 410 p.
8. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий ВНИИПО МЧС России / И.А. Болодьян [и др.], 2006.
9. Quintiere J.G. Principles of Fire Behaviour. New York: Delmar Publishers, 1997. 258 p.
10. Quintiere J.G. Surface Flame Spread // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd ed. Quincy MA: NFPA, 2002. P. 246–257.

11. Снегирев А.Ю., Талалов В.А. Теоретические основы пожаро- и взрывобезопасности. Горение неперемешанных реагентов: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 212 с.

12. Ройтман М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве. 2-е изд., перераб. и доп. М.:Стройиздат, 1985. 590 с.

13. Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов. 2-е изд., испр. и доп. М.: ВНИИПО, 2019. 344 с.

14. Романенко П.Н., Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1977. 415 с.

15. Методика проведения численного эксперимента для моделирования динамики распространения пожара между объектами защиты при производстве судебной нормативной пожарно-технической экспертизы / Лобова С.Ф., Тумановский А.А., Хасанов И.Р. и др.; под общ. ред. Воронова С.П. – СПб: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России», 2025. 36 с.

Примеры
использования методики проведения численного эксперимента
для моделирования динамики распространения пожара
между объектами защиты

Определение размеров ячейки расчетной сетки

Рассмотрим сценарий пожара в здании II степени огнестойкости класса функциональной пожарной опасности Ф1.3.

План рассматриваемого этажа здания представлен на рисунке 1.1

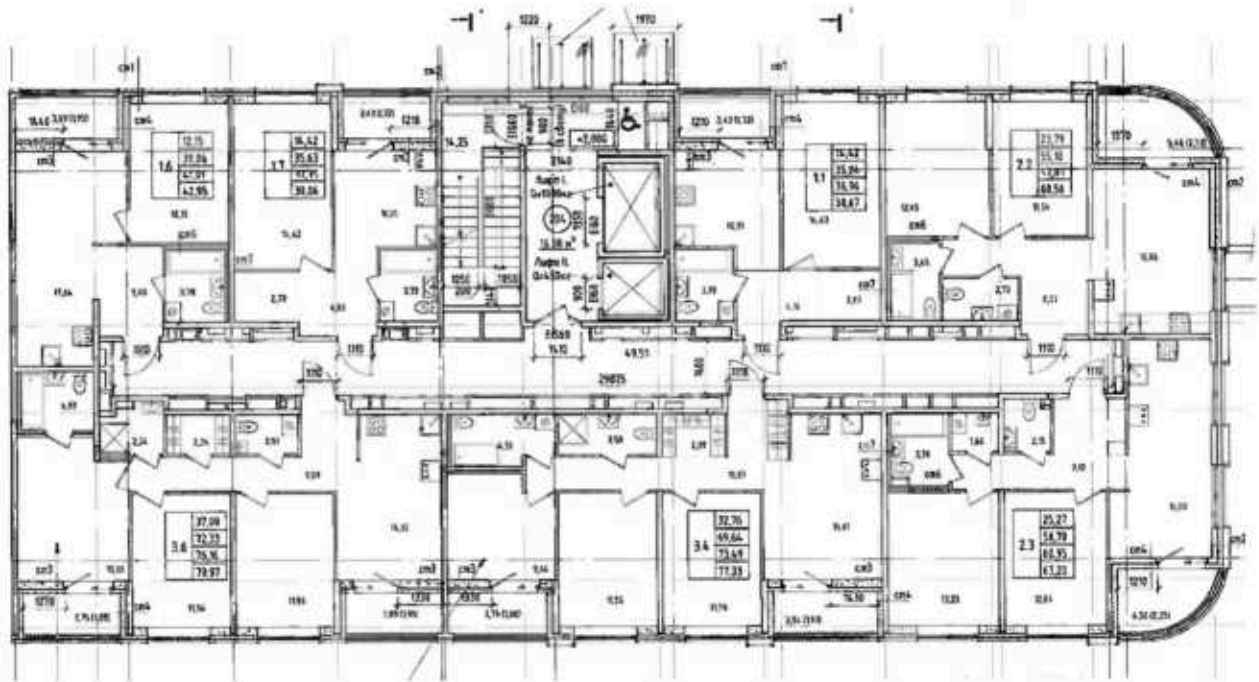


Рисунок 1.1 – План 2-ого этажа здания

Тепловое воздействие в данном случае рассматривается через проемы в ограждающих конструкциях здания. Следовательно, под площадью поверхности горения в данном случае необходимо понимать площадь проема в ограждающих конструкциях здания.

Выберем наименьший проем на этаже. Такой оконный проем в свету имеет размер 1800×1600 мм. Следовательно, площадь поверхности горения составит 2,88 м².

Для здания класса функциональной пожарной опасности Ф1.3 типовая пожарная нагрузка принимается из Приложения 9 [3] как для помещения вида «Жилые помещения гостиниц, общежитий и так далее». Низшая теплота

сгорания для данной нагрузки составляет 13,8 МДж/кг, удельная массовая скорость выгорания – 0,0145 кг/ (м²·с).

Найдем мощность очага пожара при площади поверхности горения 2,88 м², которая составит: $\dot{Q} = 13800 \cdot 0,0145 \cdot 2,88 = 576,288$ кВт.

Учитывая, что $T = 297$ К, $\rho = 1,2$ кг/м³, $c = 1$ кДж/кг·К, $g = 9,8$ м/с², значение характерного диаметра поверхности горения будет следующим:

$$D^* = \left(\frac{576,288}{297 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot \sqrt{9,8}} \right)^{\frac{2}{5}} \approx 0,77 \text{ (м)}.$$

Рассмотрим сетку с размером ячейки 0,1 м. Тогда отношение характерного диаметра к линейному размеру ячейки сетки составит:

$$\frac{D^*}{\Delta x} = \frac{0,77}{0,1} = 7,7 > 4.$$

В этом случае соотношение $\frac{D^*}{\Delta x}$ попало в нужный интервал [4;16], следовательно, данный размер ячейки, равный 0,1 м, способен корректно разрешить пламя мощностью 576,288 кВт и размером 2,88 м².

Далее необходимо убедиться, что получаемые на данной расчетной сетке результаты моделирования нечувствительны к размеру ячейки сетки при ее уменьшении. Для этого необходимо провести расчеты нескольких тестовых сценариев пожара, в которых рассматривается тепловое воздействие на облучаемый объект, например, стену соседнего здания, расположенную на расстоянии 7,0 м, из одного оконного проема размерами 1800×1600 мм.

Математическая модель тестовых сценариев представлена на рисунках 1.2 и 1.3.

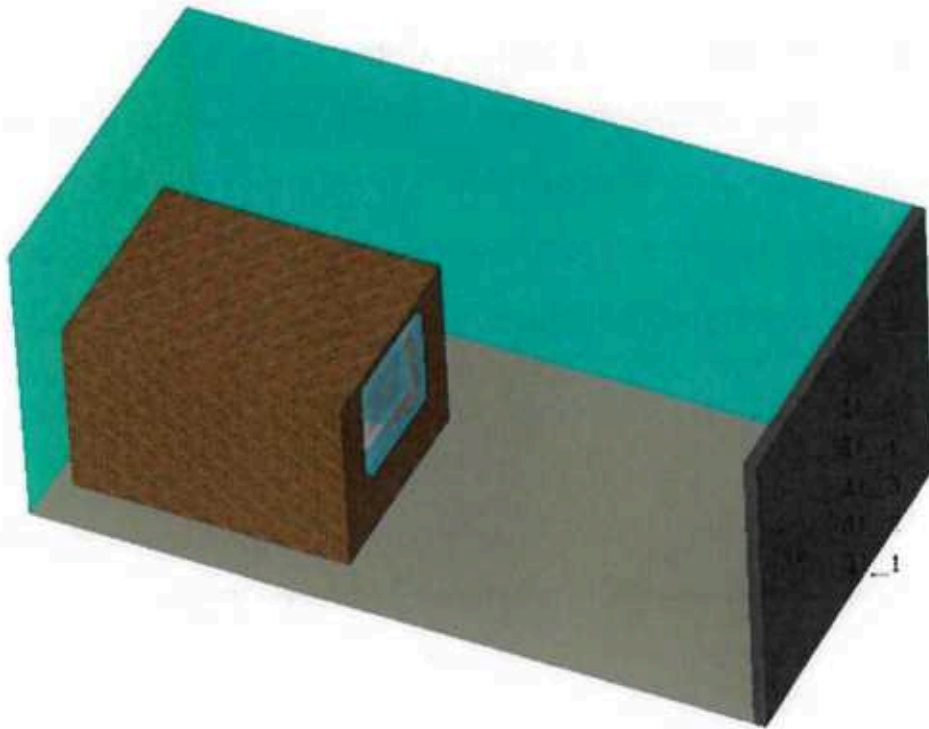


Рисунок 1.2 – Математическая модель тестового сценария

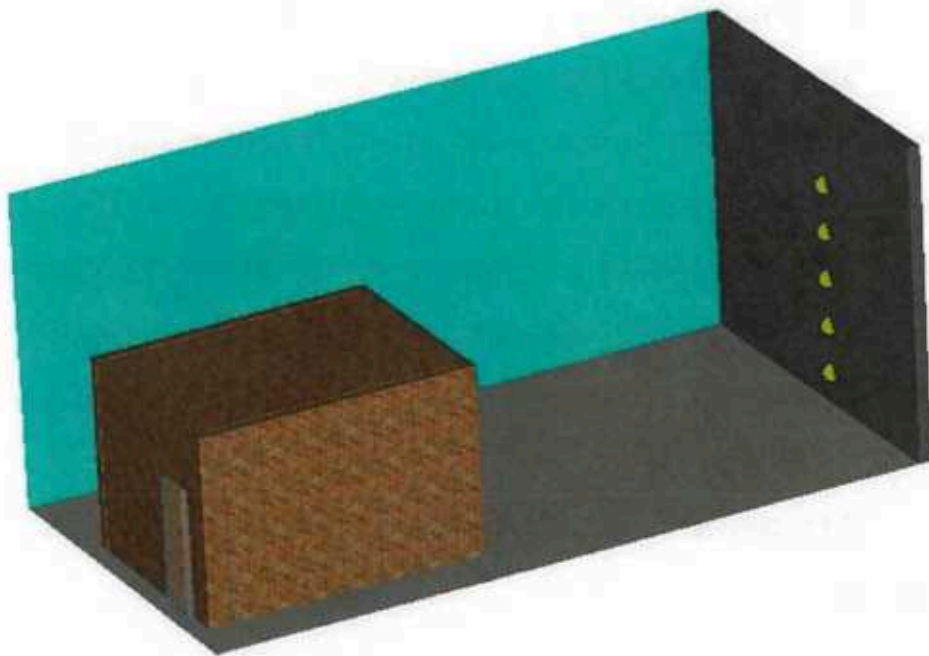


Рисунок 1.3 – Расположение в тестовом сценарии датчиков теплового потока на стене соседнего здания

В тестовом сценарии №1 рассматривается сетка с размером ячейки 0,1 м. В тестовом сценарии №2 рассматривается сетка с размером ячейки в два раза меньше предыдущей, т.е. с размером 0,05 м. Размер проема 1600×1800 мм. Остекление отсутствует. Зона горения в помещении задана плоской поверхностью с увеличенной удельной массовой скоростью выгорания.

Визуализация пламени представлена на рисунках 1.4 и 1.5.

Результаты теплового воздействия на стену соседнего здания в рассмотренных сценариях пожара представлены на графиках на рисунке 1.6.

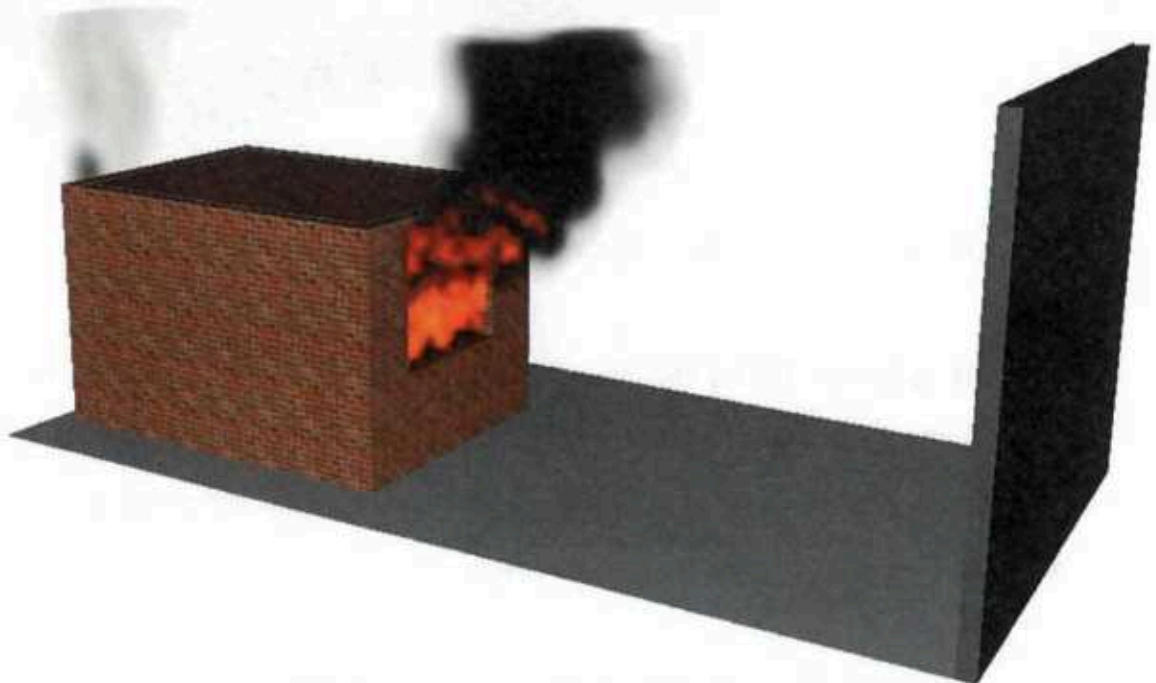


Рисунок 1.4 – Визуализация пламени на сетке 0,1 м

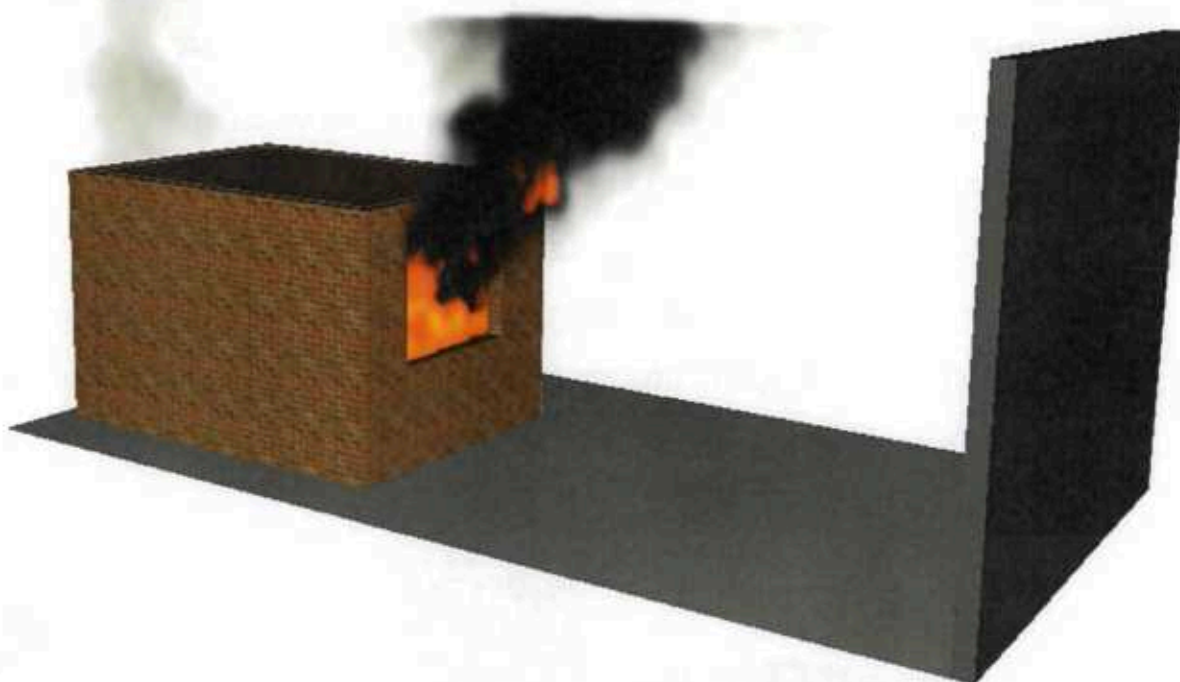


Рисунок 1.5 – Визуализация пламени на сетке 0,05 м

В таблице 1.1 представлены результаты моделирования на сетке 0,1 м. В таблице 1.2 представлены результаты моделирования на сетке 0,05 м. На графиках на рисунках 1.5-1.9 приведены сравнения значений теплового потока для двух рассмотренных сеток.

Таблица 1.1 – Показания датчиков теплового потока, размер ячейки расчетной сетки 0,1 м

s	kW/m ²	kW/m ²	kW/m ²	kW/m ²	kW/m ²
Time	Д1_1	Д1_2	Д1_3	Д1_4	Д1_5
0,00	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
10,00	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
20,00	0,63	0,63	0,60	0,63	0,64
30,00	0,63	0,63	0,60	0,63	0,63
40,01	0,63	0,64	0,67	0,67	0,66
50,01	0,65	0,68	0,72	0,72	0,71
60,01	0,68	0,71	0,76	0,78	0,75
ср зн	0,63	0,64	0,65	0,66	0,66

Таблица 1.2 – Показания датчиков теплового потока, размер ячейки расчетной сетки 0,05 м

s	kW/m2	kW/m2	kW/m2	kW/m2	kW/m2
Time	Д1_1	Д1_2	Д1_3	Д1_4	Д1_5
0,00	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
10,00	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
20,00	0,63	0,62	0,59	0,62	0,63
30,00	0,65	0,64	0,60	0,64	0,65
40,00	0,63	0,62	0,62	0,64	0,64
50,00	0,62	0,63	0,65	0,66	0,65
60,00	0,66	0,67	0,71	0,73	0,70
ср зн	0,62	0,62	0,62	0,64	0,64

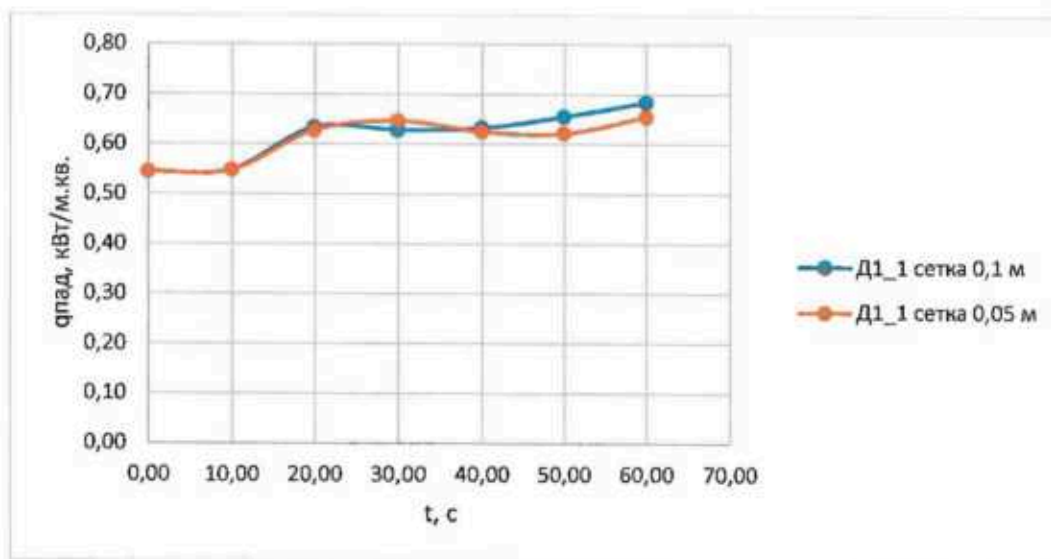


Рисунок 1.5 – Показания датчика Д1_1

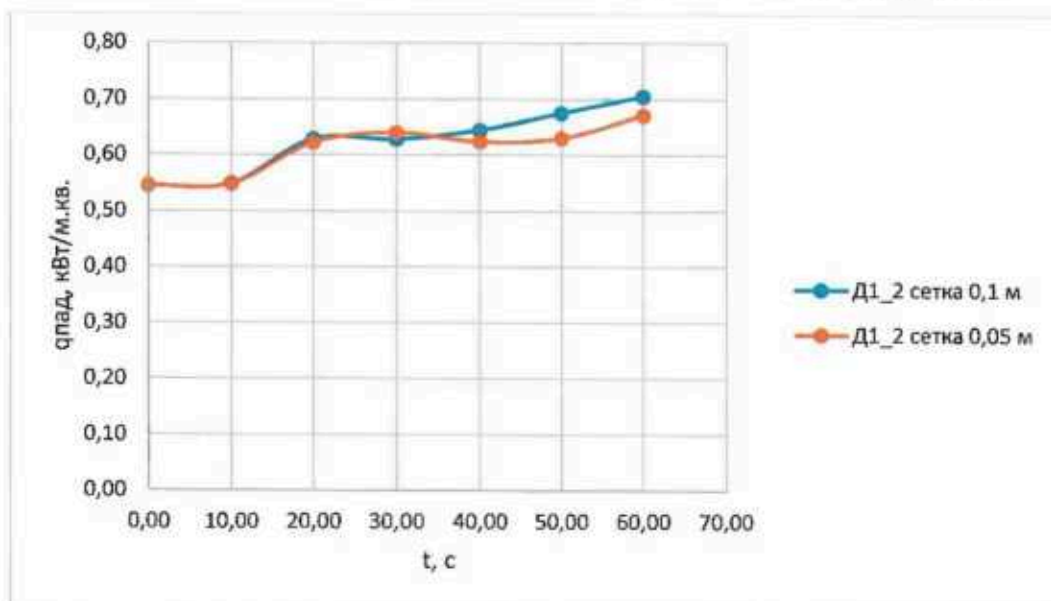


Рисунок 1.6 – Показания датчика Д1_2

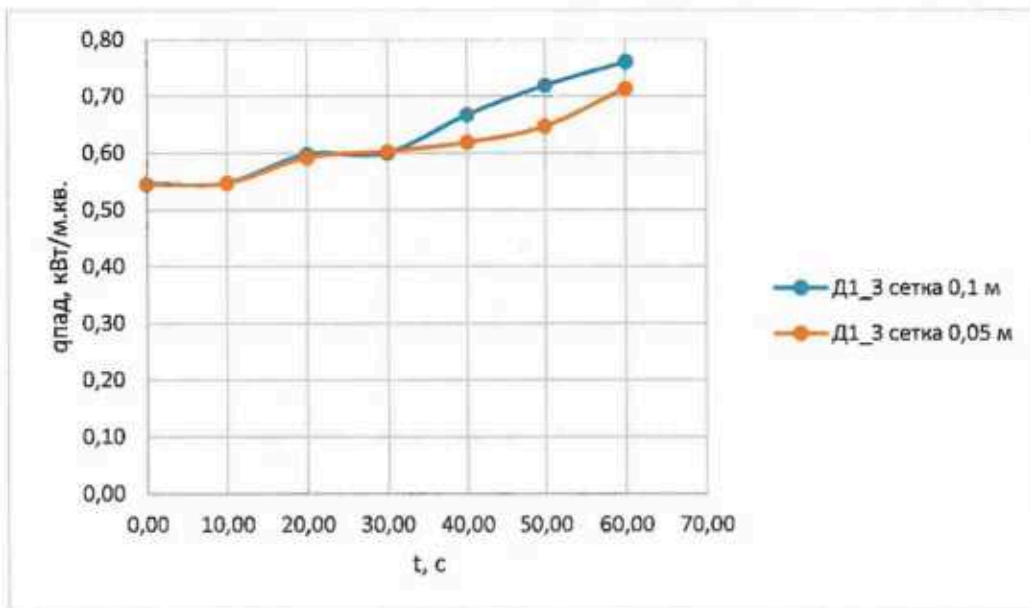


Рисунок 1.7 – Показания датчика Д1_3

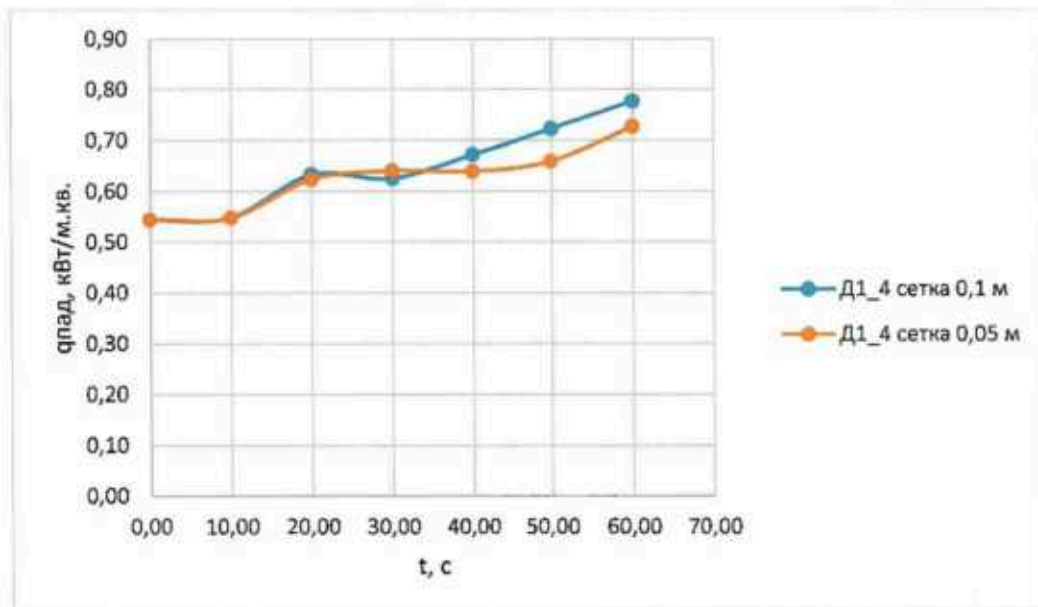


Рисунок 1.8 – Показания датчика Д1_4

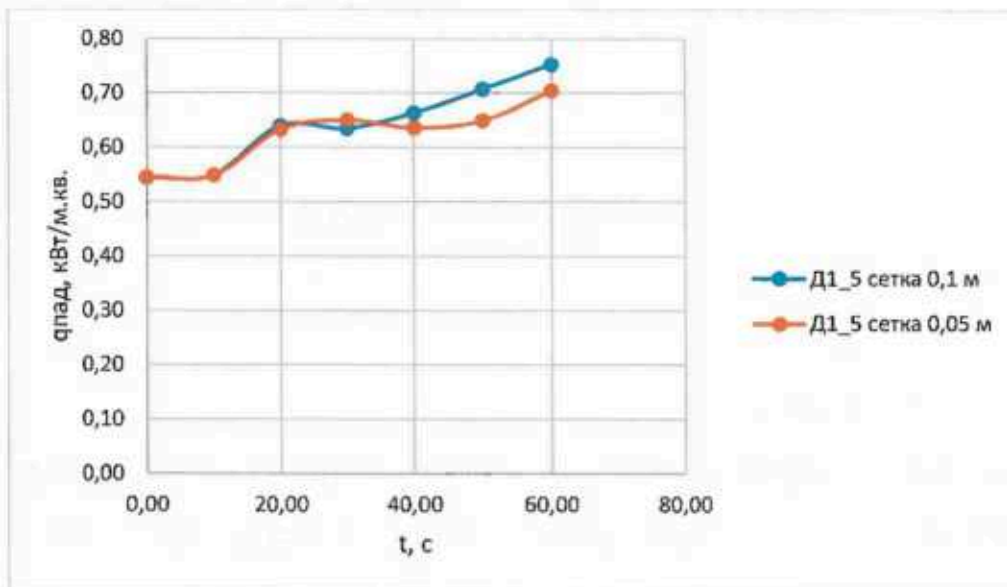


Рисунок 1.9 – Показания датчика Д1_5

В таблице 1.3 приведена разница полученных значений, Δ , %, тепловых потоков на двух рассмотренных сетках, вычисленная по формуле:

$$\Delta = \frac{(q_{пад1} - q_{пад2})}{q_{пад1}} 100\%.$$

Таблица 1.3 – Разница полученных значений теплового потока

s	%	%	%	%	%
Time	Д1_1	Д1_2	Д1_3	Д1_4	Д1_5
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,00	0,07	0,06	0,02	0,03	0,04
20,00	0,92	0,96	0,84	1,34	0,97
30,00	-2,95	-1,83	-0,47	-2,49	-2,44
40,01	1,09	3,23	7,21	4,75	4,10
50,01	5,05	6,63	10,00	8,72	8,21
60,01	4,21	4,81	6,14	6,30	6,44
ср зн	1,49	2,46	4,34	3,44	3,16

Сравнение значений теплового потока в точках расположения датчиков для двух сценариев показало, что разница между ними незначительная для данного класса задач, менее 10 %. Отличие же средних значений тепловых потоков не превышает 5 %. Следовательно, полагаем, что сетка с размером ячейки 0,1 м позволяет получить в данном конкретном случае корректные результаты.

**Расчет угрозы распространения пожара между зданием торгового комплекса
II степени огнестойкости и торговыми павильонами
IV степени огнестойкости, расположенными на расстоянии
менее 6,0 м от торгового комплекса**

Цель исследования

Ответить на вопрос, имеется ли угроза распространения пожара между объектами при минимальном противопожарном расстоянии между ними равном 2,0 м?

Использованная литература и информационные источники

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности N123-ФЗ от 22.06.2008 г.
2. СП 4.13130.2013 «Системы противопожарной защиты. Ограничение распространение пожара на объектах защиты» (с изм. №1, 2, 3, 4).
3. СП 131.13330.2020 «Строительная климатология».
4. Приложения к Приказу МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности».
5. Программное обеспечение для расчетов в области пожарной безопасности: URL: <https://pyrosim.ru/> Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. / K. McGrattan [et al.]. NIST Special Publication 1018-1, Sixth edition. 2018. 163 p.
6. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Vol. 3: Validation. / K. McGrattan [et al.] NIST Special Publication 1018-3, Sixth edition. 2020. 1055 p.
7. Ройтман М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1985. 590 с.

Согласно положений п. 4.3 СП 4.13130.2013 [2] противопожарные расстояния между жилыми, общественными зданиями и сооружениями допускается уменьшать при условии подтверждения предотвращения распространения пожара в соответствии с Приложением А.

При расчетном обосновании сокращения противопожарных расстояний рассматриваются только аспекты предотвращения распространения пожара между объектами защиты без учета требований строительной, санитарной и экологической безопасности. Внедрение результатов должно проводиться при обязательном соблюдении требований к устройству проездов и подъездов для пожарной техники.

В соответствии с п. А.3.1 Приложения А [2] для определения падающего теплового потока также допускается применение полевого моделирования с использованием программных продуктов, позволяющих осуществлять расчеты опасных факторов пожара в открытом пространстве. В качестве расчетных сценариев пожара должны приниматься сценарии с возникновением возгорания в пределах помещения, группы помещений или наружных поверхностей стен и кровли в соответствии с п. А.3.2. Моделирование следует вести до момента, когда площадь принятых согласно сценарию излучающих поверхностей станет максимальной.

Для подтверждения нераспространения пожара между зданиями, сооружениями следует рассмотреть расчетные сценарии проектного пожара на каждом из объектов и оценить значения падающего теплового потока (далее также - тепловое воздействие) на соседний объект защиты.

В ходе проведения расчетов должны быть решены следующие задачи:

5) определение максимальных тепловых потоков, падающих на горючие материалы наружных конструкций зданий на расстояниях менее нормативного в случае возникновения пожара на каждом из объектов;

6) сравнение максимальных падающих тепловых потоков с критическими значениями тепловых потоков для горючих материалов, входящих в состав наружных конструкций облучаемых объектов, и оценка возможности распространения пожара между зданиями;

7) определение (при необходимости) вида дополнительных противопожарных мероприятий, обеспечивающих снижение значений падающего теплового потока на расстояниях менее нормативных.

Краткая характеристика объектов

Торговый комплекс (рисунки 2.2 и 2.3).

Торговый комплекс предусмотрен II степени огнестойкости и класса конструктивной пожарной опасности С0.

Исследуемая часть здания – фасад №8.

Этажность – 2 этажа. Высота торговой встроено-пристроенной части – менее 10 метров.

Материал отделки стен – металлический профилированный лист, облицовочный кирпич.

Междуэтажный карниз, оконные откосы – металлический профилированный лист.

Остекление оконных проемов – металлопластиковые рамы, противопожарное заполнение отсутствует.



Рисунок 2.2 – Фасад здания торгового комплекса



Рисунок 2.3 – Внешний вид фрагмента фасада №8

Торговые павильоны (рисунок 2.4).

Нестационарные одноэтажные павильоны (5 шт), размерами 5×10×3,1 м.
Каркас – металлическая профильная труба Ш 8. Степень огнестойкости – IV.

Кровля – односкатная. Профнастил МП 20-0.45. Утепление УРСА 100 мм, пароизоляция – «Изостронг» В.

Главный фасад – остекление из алюминиевого профиля, противопожарное заполнение отсутствует.

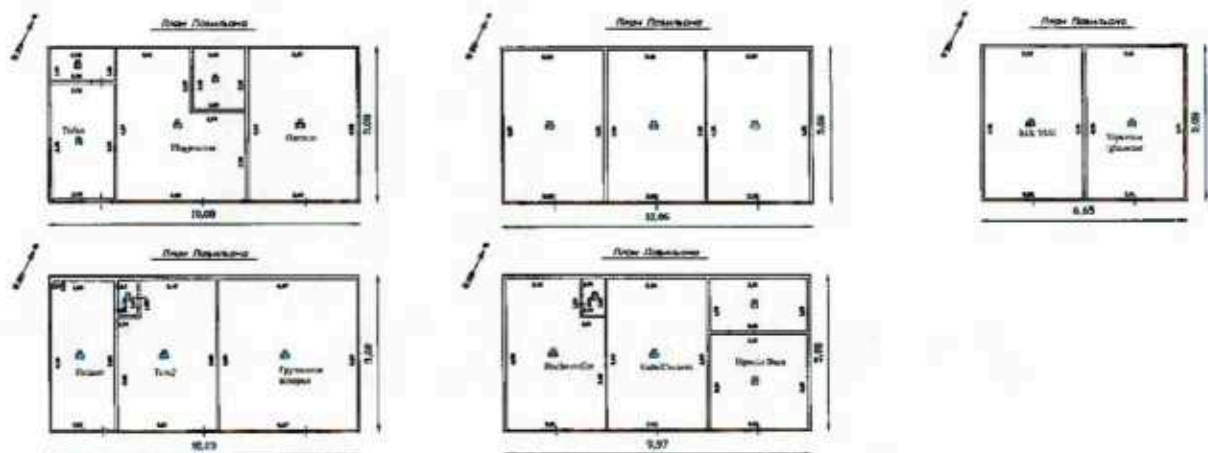


Рисунок 2.4 – Планы павильонов с расположением остеклённых фасадов (красные линии)

Методология проведения расчетной оценки

Методология расчетного обоснования сокращения противопожарного расстояния между объектами основывается на положениях методики Приложения А [2] и состоит в определении величины падающего теплового потока от пламени пожара в одном из зданий на горючие материалы наружных конструкций соседнего объекта, на материалы, находящиеся за остекленными оконными проемами, или в иных проемах наружных конструкций. Полученные значения теплового потока сравниваются с критическими значениями теплового потока, превышение которых является необходимым условием для воспламенения имеющихся горючих материалов.

В случае, если величина падающего теплового потока не превышает критическое значение, делается вывод о невозможности на рассматриваемом расстоянии воспламенения горючих материалов наружных конструкций и иных материалов посредством излучения от пожара в одном из зданий. При этом рассмотрению не подлежит перенос горящих или раскаленных частиц и зажигание от них.

При расчете рассматривается наихудший сценарий развития пожара. Принимается максимальная мощность тепловыделения при пожаре, зона горения располагается рядом с проемами в наружных конструкциях, через которые моделируется выброс пламени. Рассматривается стадия общей вспышки, когда пожар происходит во всех помещениях на этаже, либо на наружных сторонах здания и кровли (при V степени огнестойкости зданий). Рассчитывается максимальный падающий тепловой поток, при этом задача прогрева конструкций в большинстве случаев не решается, а время моделирования определяются достижением максимальной мощности тепловыделения при пожаре.

На основании анализа пожарной опасности здания торгового комплекса и павильонов и расположения друг относительно друга оконных и иных проемов в наружных конструкциях исследуемых объектов, рассмотрению подлежат следующие сценарии проектных пожаров:

Сценарий №1 – сценарий проектного пожара, при котором происходит загорание внутри здания торгового комплекса. В качестве горючей нагрузки принимается типовая горючая нагрузка «магазины» [4]. Предполагается, что пожаром охвачены все помещения этажа. Остекление фасада №4 считается разрушенным с момента начала моделирования.

Сценарий №2 – сценарий проектного пожара, при котором происходит загорание внутри торгового павильона, расположенного на минимальном расстоянии от торгового комплекса, равном 2,0 м. В качестве горючей нагрузки принимается типовая горючая нагрузка «магазины» [4]. Предполагается, что пожаром охвачены все помещения павильона. Остекление считается разрушенным с момента начала моделирования.

Сценарий №3 – сценарий проектного пожара, при котором происходит загорание внутри торгового павильона, расположенного на минимальном расстоянии от торгового комплекса, равном 2,0 м. В качестве горючей нагрузки принимается типовая горючая нагрузка «магазины» [4]. Предполагается, что пожаром охвачены все помещения павильона. Остекление считается разрушенным с момента начала моделирования. Развитие пожара рассматривается в условиях наличия ветра, направленного в сторону торгового комплекса. Скорость ветра принята 5 м/с.

Наличие ветра со стороны торгового комплекса в направлении павильонов в данном случае не будет иметь никакого эффекта, т.к. высота торгового комплекса больше высоты павильонов и здание комплекса экранирует действие ветра.

Далее рассмотрим расчет сценария №1.

Для проведения моделирования используется специализированный программный код FDS (Fire Dynamics Simulator) [5] в препроцессоре PyroSim [6,7].

Необходимо отметить, что данный расчет не учитывает перенос тепла горящими частицами, искрами. Распространение указанных частиц с сохранением зажигательной способности происходит на расстояния,

значительно превышающие нормативные. А значит передача тепла посредством массопереноса раскаленных или горящих частиц в большинстве случаев не может являться критерием эффективности противопожарного расстояния. Так же в соответствии с [8] анализ причин распространения пожара между зданиями показал, что для обоснования величины противопожарных разрывов следует учитывать тепло, передаваемое пламенем посредством излучения.

Математическая модель объектов

Математические модели рассматриваемых объектов в расчетной области представлены на рисунках 2.5–2.7. Желтыми точками обозначены датчики, регистрирующие падающий тепловой поток излучения.

Расчетные области представляют собой объемы, моделирующие окружающее пространство, с открытыми внешними границами или с границами, на которых задан поток внешнего воздуха (ветер). Внутри расчетных объемов помещены части зданий.

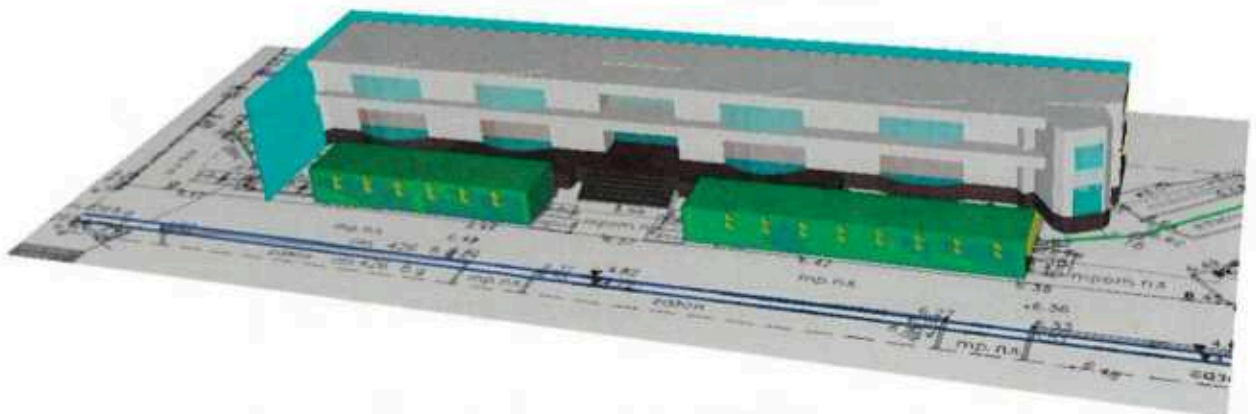


Рисунок 2.5 – Расположение датчиков теплового потока на фасадах павильонов (стены павильонов с проемами)

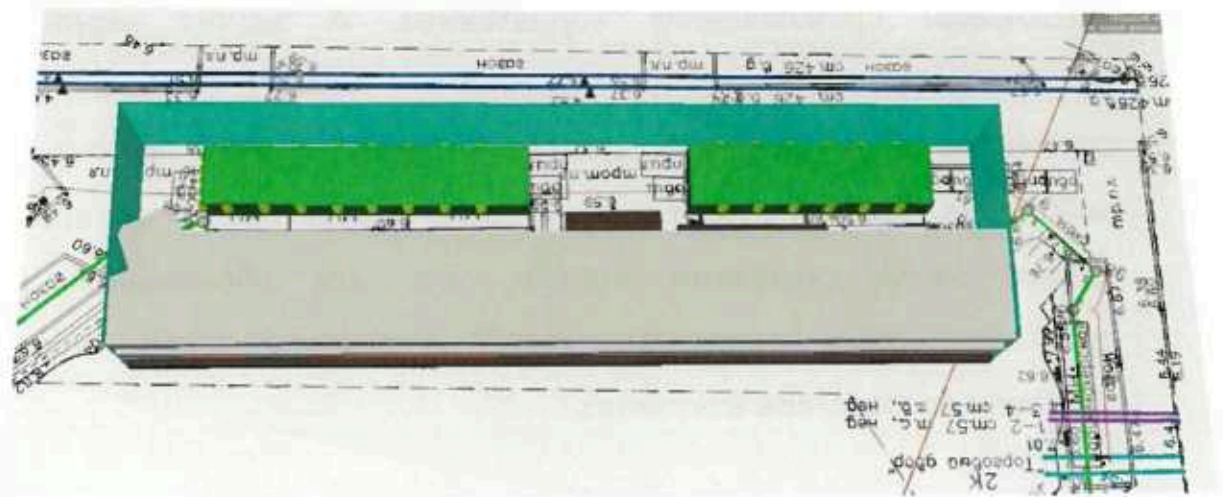


Рисунок 2.6 – Расположение датчиков теплового потока на фасадах павильонов (глухие стены, обращенные к ТК)

Поскольку в расчете предполагается, что параметры пожара (площадь и мощность тепловыделения) имеют наибольшие не меняющиеся со временем значения, то для получения максимальных значений падающего теплового потока (которые в дальнейшем меняться уже не будут) моделирование осуществляется в течение 120 с, что соответствует требованию п. А.3.1 Приложения А [2].

Зона горения задается плоской поверхностью на уровне пола с модифицированной массовой скоростью выгорания, увеличенной в соответствии с 2-х кратным значением площади помещения очага пожара.

Расчетные сетки показаны на рисунке 2.7. Сетки используются равномерные декартовы, размер ячеек составляет $0,05 \times 0,05 \times 0,05$ м. (выбор размера сетки осуществляется в соответствии с примером 1).

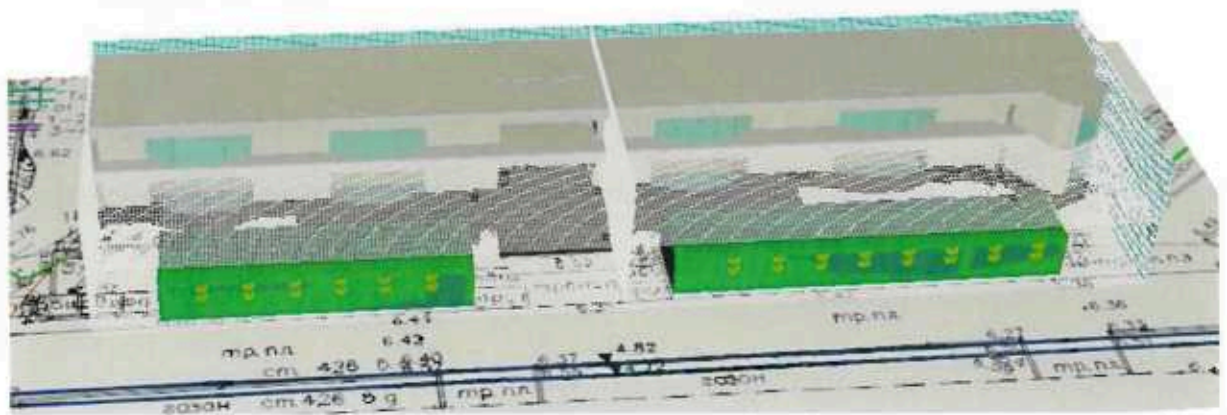


Рисунок 2.7 – Расчетная область, покрытая расчетными декартовыми сетками

Исходные данные для проведения расчета

Для проведения анализа возможности распространения пожара между объектами, находящимися на расстоянии друг относительно друга, т.е. возможности зажигания горючих материалов падающим тепловым потоком излучения, используются справочные данные, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Критические значения падающего теплового потока для различных горючих материалов, по данным [2]

Материал	q_{cr} , кВт/м ²
Древесина (сосна влажностью 12%)	13,9
Древесно-стружечные плиты (плотностью 417 кг/м ³)	8,3
Плита древесно-волокнистая	13,0
Плита древесно-стружечная	12,0
Картон серый	10,8
Декоративный бумажно-слоистый пластик	19,0–24,0
Полистирол	15,0
Полипропилен	13,0
Нейлон	10,0
Полиэтилен	15,0
Поликарбонат	15,0
ПВХ-панели	17,0
ПВХ листовой	15,0
Пенополиуретан (панели)	13,0
Пенополистирол (панели)	10,0
Полиэстер	8,0
Вискоза	14,0–17,0
Стеклопластик	15,3
Стеклопластик на полиэфирной основе	14,0
Пергамин	17,4
Рулонная кровля	17,4
Резина	14,8
Металлопласт	24,0–27,0
Лакокрасочные покрытия	25,0
Сено, солома (при минимальной влажности 8%)	7,0

При отсутствии данных для горючего материала допускается принимать критический тепловой поток равным 8 кВт/м² [2].

Воздействие теплового излучения на горючие материалы, находящиеся за остекленными проемами, при расчете допускается учитывать как воздействие на проем, заполненный материалом с критическим тепловым потоком равным 15 кВт/м² [2].

Для облучаемого здания с негорючими конструкциями с пределом огнестойкости не менее EI 15 необходимо производить расчет прогрева ограждающих конструкций и оценку их огнестойкости с учетом фактического теплового воздействия. Допускается принимать $q_{\text{крит}} = 20 \text{ кВт/м}^2$.

В настоящей работе сравнение значений падающего теплового потока с критическими производится для следующих материалов, входящих в состав наружных конструкций или временно расположенных за остекленными проемами в наружных конструкциях объектов:

- металл (наружные несущие стены, несущие конструкции);
- металлопласт (оконные, дверные проемы);
- горючие материалы, находящиеся за остекленными проемами.

Максимальная температура воздуха в климатической зоне (г. Санкт-Петербург) принимается в соответствии с [3] равной $37 \text{ }^\circ\text{C}$.

Параметры горючей нагрузки приведены в таблице № 2.

Таблица 2 – Параметры горючей нагрузки «магазины» [4]

Параметр	Единица измерения	Значение
Низшая теплота сгорания	кДж/кг	15 800
Линейная скорость распространения пламени	м/с	0,0045
Удельная массовая скорость выгорания	кг/(м ² · с)	0,015
Дымообразующая способность	Нп · м ² /кг	270
Потребление кислорода (O ₂)	кг/кг	1,25
Выделение углекислого газа (CO ₂)	кг/кг	0,85
Выделение угарного газа (CO)	кг/кг	0,043
Выделение хлористого водорода (HCl)	кг/кг	0,023

Результаты расчета

Результаты моделирования сценария №1 представлены на рисунках № 2.8–2.11.

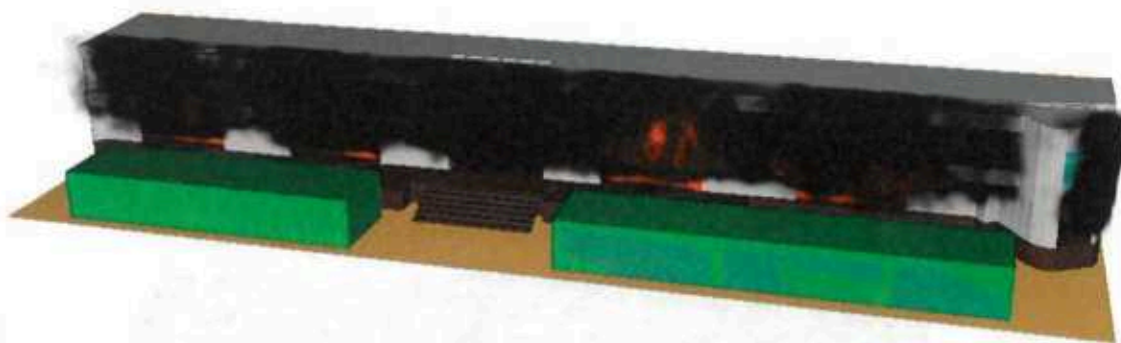


Рисунок 2.8 – Численная 3-D модель пожара в здании ТК

На рисунках 2.9 и 2.10 показано распределение падающего теплового потока излучения на наружных конструкциях рассматриваемых павильонов в случае проектного пожара в здании ТК (сценарий №1).

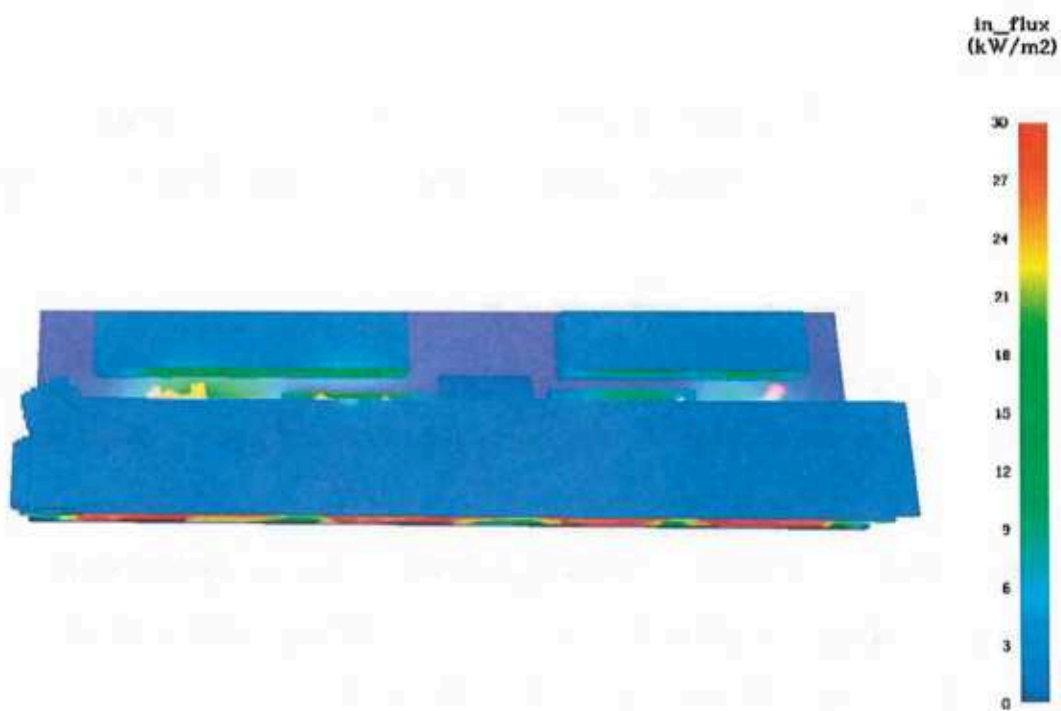


Рисунок 2.9 – Распределение падающего теплового потока на наружные конструкции павильонов, сценарий №1

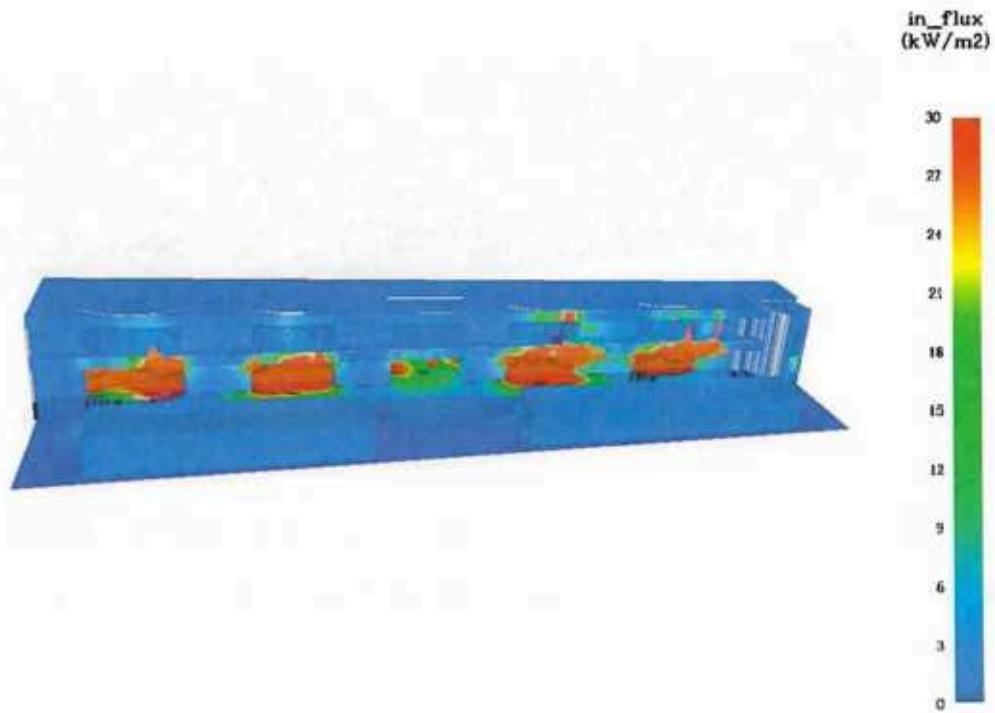


Рисунок 2.10 – Распределение падающего теплового потока на наружные конструкции павильонов, противоположный фасад, сценарий №1

Графики тепловых потоков

На графиках ниже представлены показания датчиков, регистрирующих максимальное тепловое воздействие (наибольшее значение падающего теплового потока излучения) в областях расположения проемов и на наружных глухих конструкциях рассматриваемых павильонов. Максимальное значение потока на фасад, обращенный к торговому комплексу, получено от датчика «SOLID21».

Максимальное значение потока на фасад с остекленными проемами, получено от датчика «SOLID29».

По оси ординат приведены значения величины падающего теплового потока излучения, q , кВт/м², по оси абсцисс – время моделирования, с.



Рисунок 2.11 – Максимальное тепловое воздействие (падающий тепловой поток излучения) на область глухой конструкции павильона, сценарий №1

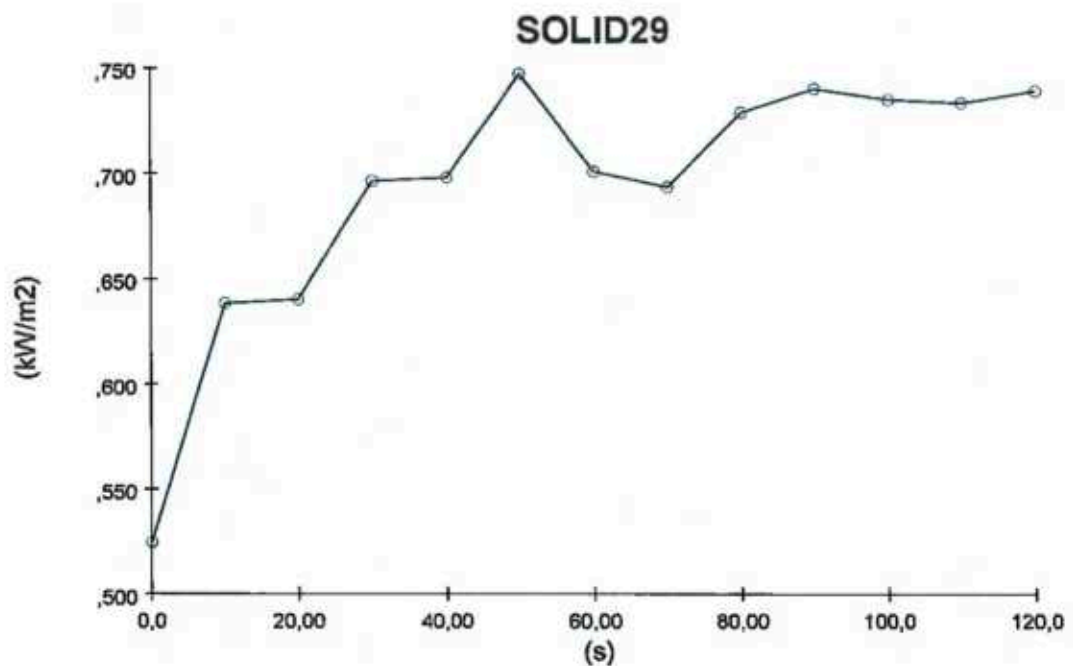


Рисунок 2.12 – Максимальное тепловое воздействие (падающий тепловой поток излучения) на область остеклённых проемов павильонов, расстояние 2,0 м до ТК, сценарий №1

Ниже представлены табличные значения показаний датчиков теплового потока.

Сценарий №1

Таблица 4 – Показания датчиков, расположенных на фасадах павильонов, обращенных к торговому комплексу

Время	kW/m2	kW/m2	kW/m2	kW/m2	kW/m2	kW/m2	kW/m2	kW/m2	kW/m2
	SOLID01	SOLID12	SOLID13	SOLID15	SOLID18	SOLID19	SOLID20	SOLID21	SOLID23
0,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
10,0	6,7	5,7	6,7	5,7	4,7	5,6	6,5	7,5	7,2
20,0	8,1	8,8	10,1	8,8	7,7	8,3	10,4	11,9	12,4
30,0	8,0	10,1	11,7	10,4	9,9	10,7	13,1	14,9	14,6
40,0	9,1	12,8	14,5	13,9	11,8	12,9	14,9	16,8	15,7
50,0	10,3	14,6	17,0	14,6	13,4	14,7	16,5	18,6	16,5
60,0	10,7	13,7	15,8	15,0	13,2	15,0	16,3	18,6	16,6
70,0	10,7	13,0	15,0	14,4	12,8	14,6	15,8	18,2	16,3
80,0	10,8	12,7	14,6	14,2	12,3	14,0	15,3	17,5	15,5
90,0	9,8	14,6	17,0	16,2	13,2	14,7	16,7	19,0	17,0
100,0	10,1	15,8	18,2	16,8	14,0	15,3	16,5	18,6	16,7
110,0	11,0	16,2	18,6	17,0	14,1	15,4	17,0	19,2	17,3
120,0	10,5	15,5	17,7	16,0	13,3	14,7	16,4	18,5	16,8
ср. зн.	10,1	13,9	16,0	14,9	12,8	14,2	15,9	18,0	16,3

Таблица 5 – Показания датчиков, расположенных в области остекленных проемов павильонов

Время	kW/m2	kW/m2	kW/m2	kW/m2	kW/m2	kW/m2	kW/m2	kW/m2	kW/m2
	SOLID29	SOLID30	SOLID31	SOLID33	SOLID34	SOLID35	SOLID36	SOLID37	SOLID38
0,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
10,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
20,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
30,0	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
40,0	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
50,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
60,0	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
70,0	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
80,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
90,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
100,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
110,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
120,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
ср. зн.	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5

Сравнивая результаты моделирования, приведенные в таблицах 4–5, и справочные данные, приведенные в разделе «Исходные данные» в таблице 1, можно заключить, что в условиях рассмотренного сценария проектного пожара полученные расчетные значения падающего теплового потока на материалы наружных конструкций рассматриваемых объектов (торговых

павильонов) превышают критические значения тепловых потоков, при превышении которых происходит возгорание рассматриваемых горючих материалов или достижение предельного состояния конструкции. Итоговые результаты расчетов представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Сравнительная таблица полученных результатов

Область воздействия	Материалы	Тепловое воздействие, кВт/м ²			Результат воздействия
		Критический поток	Падающий поток	Расчетный поток (падающий с учетом погрешности 20%)	
Сценарий №1					
Наружные конструкции, кровля	Металлические конструкции с пределом огнестойкости не менее EI 15	20	18	21,6	Опасно
Проемы	Металлопласт и неизвестные материалы в проемах	24/15	0,7	0,84	Не опасно

Вывод

Расчетные значения падающего теплового потока, воздействующего на материалы наружных конструкций торговых павильонов, расположенных по адресу: город N., при проектном пожаре в здании торгового комплекса по адресу: город N., расположенных на минимальном расстоянии 2,0 м друг относительно друга, превышают критические значения падающих тепловых потоков для материалов, используемых в наружных конструкциях рассматриваемых павильонов, что свидетельствует о наличии угрозы распространения пожара между объектами вследствие теплового воздействия (излучения) от пламени пожара. Сокращение расстояния между объектами при настоящих параметрах наружных конструкций павильонов до расстояния 2,0 м недопустимо.

Разработка дополнительных противопожарных мероприятий, которые позволяют снизить уровень теплового воздействия на горючие материалы наружных конструкций облучаемого объекта

Необходимым оборудованием в городской газораспределительной системе являются газорегуляторные установки для осуществления понижения входного давления из резервуаров сжиженного углеводородного газа (СУГ) до необходимого уровня. Наличие указанных резервуаров существенно повышает пожарную опасность объектов. В большинстве случаев в качестве основных аварийных ситуаций рассматриваются сценарии разгерметизации резервуаров с различными диаметрами отверстий, включая их полное разрушение. При том возможны пожары с диффузионным струйным горением, пожары пролива топлива и огненные шары. В этом случае оценить достаточность противопожарного расстояния между объектами с помощью расчета падающего теплового потока некорректно.

Вместе с тем, в некоторых случаях, установки имеют подземное оборудование. Поэтому опасность с точки зрения воздействия опасных факторов пожара на соседнее здание в этом случае представляет только сценарий разгерметизации на дыхательной арматуре и образования струйного пламени.

Рассмотрим пример, в котором целью исследования является изучение параметров пожара от подземных резервуаров СУГ в составе газорегуляторной установки для определения количественных характеристик теплового воздействия на соседний объект защиты (здание отеля) путем полевого моделирования в целях оценки достаточности противопожарных расстояний между объектами и при необходимости разработки эффективных требований к противопожарным преградам.

Использованная литература и информационные источники

8. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности N123-ФЗ от 22.06.2008 г.
9. СП 4.13130.2013 «Системы противопожарной защиты. Ограничение распространение пожара на объектах защиты» (с изм. №1, 2, 3, 4).
10. Программное обеспечение для расчетов в области пожарной безопасности: URL: <https://pyrosim.ru/>
11. Приложение к приказу МЧС России от 26.06.2024 г № 533. «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах». Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

Методика исследования

При пожаре тепловому воздействию подвергаются материалы и конструкции соседних объектов – стены, фасадные системы, материалы наружной отделки и облицовки, кровельного покрытия, материалы за остеклением и т.п. Критерием выбора безопасного противопожарного расстояния и нераспространения пожара на соседний объект является не превышение падающим тепловым потоком критических значений для воспламенения указанных материалов [2]. Кроме того, критический тепловой поток, при котором происходит дистанционное воспламенение материалов, существенным образом зависит от продолжительности облучения.

Для определения значений теплового потока излучения, падающего на наружные конструкции здания в случае пожара на резервуарах, проведем расчеты динамики пожаров по полевой модели с использованием компьютерного кода FDS в препроцессоре PyroSim [3].

Моделирование

Рассматриваемые объекты защиты – здание отеля и подземные резервуары СУГ. Предметом исследования является тепловое воздействие на объекты защиты в результате развития возможных аварийных ситуаций.

Рассматриваемые объекты защиты – проектируемое здание отеля и газорегуляторная установка ГРУ № 15 с шестью подземными резервуарами с СУГ. Емкость резервуаров – 25 м³. Схема расположения подземных резервуаров представлена на рисунке 3.1.

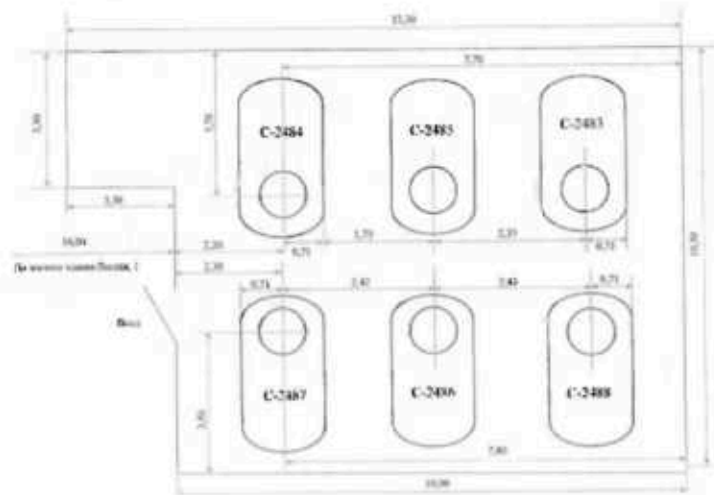


Рисунок 3.1 – Схема расположения резервуаров ГРУ №15

Здание отеля II степени огнестойкости, класса конструктивной пожарной опасности С0, класс функциональной пожарной опасности – Ф1.2. Этажность здания составляет 4–5 этажей. Максимальная высота здания от планировочной отметки земли до верха парапета 4-этажного объема – 16,0 м, до верха парапета 5-этажного объема – 20,4 м, до верха локального повышения кровли (лестничная клетка) – 23,0 м. Несущие элементы кровли – железобетонные перекрытия, утеплитель – жесткие минераловатные плиты толщиной 200–250 мм. Покрытие кровли – наплавленное рулонное покрытие, предусмотрен защитный слой гравия, толщиной 20 мм. Заполнение оконных проемов – стеклопакеты из ПВХ-панелей. Противопожарное заполнение оконных проемов отсутствует.

ГРУ №15 расположена на открытой площадке с расположенными на ней подземными резервуарами СУГ. СУГ состоит из смеси пропана C_3H_8 , бутана C_4H_{10} и этилмеркаптана C_2H_5SH . На рисунке 3.2 приведена схема взаимного расположения рассматриваемых объектов.

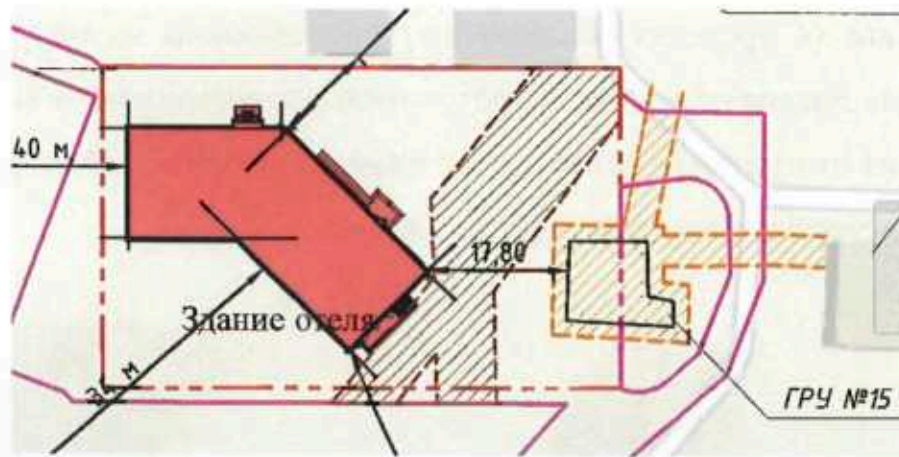


Рисунок 3.2 – Схема взаимного расположения рассматриваемых объектов

В качестве аварийных ситуаций необходимо рассмотреть сценарии, при которых происходит разгерметизация дыхательной арматуры с различными диаметрами отверстий, включая полное разрушение. Значения падающего теплового потока при рассматриваемых аварийных ситуациях определяется на наружных конструкциях здания отеля в области расположения горючих материалов.

Кроме этого, необходимо также рассмотреть тепловое воздействие от пожара в здании отеля на площадку с СУГ.

Расчетные области представляют собой объемы, моделирующие окружающее пространство, с открытыми внешними границами. Внутри расчетных объемов помещаются часть здания отеля и площадка ГРУ №15 с подземными резервуарами. Поскольку в расчете предполагается, что параметры пожара, такие как скорость истечения из отверстия, массовая скорость выгорания, высота факела, мощность тепловыделения при пожаре имеют наибольшие не меняющиеся со временем значения, то для получения максимальных численных значений тепловых потоков моделирование осуществляется в течении 60 с. Расчетные сетки выбираются неравномерные с размером ячеек от $0,15 \times 0,15 \times 0,2$ м до $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м (пример выбора размеров ячеек сеток приведен в примере 1).

Компьютерные модели струйного и естественно-конвективного пламени, образующиеся при истечении газа из отверстия и при пожаре

пролива (в пределах обвалования) представлены на рисунке 3.3. Форма и высота факела определены программой в зависимости от скорости истечения газа из отверстия (для струйного пламени) и массовой скоростью выгорания (для естественно-конвективного пламени).

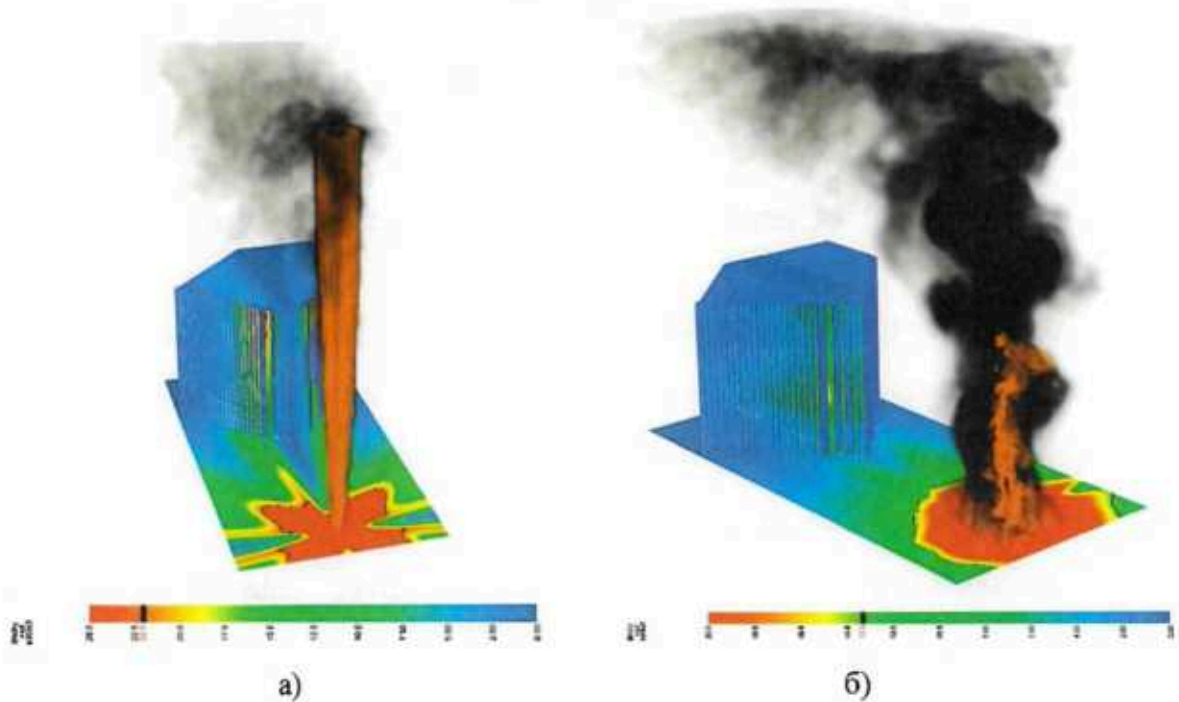


Рисунок 3.3 – Поля тепловых потоков ($\text{кВт}/\text{м}^2$) при струйном горении газа (а) и при пожаре пролива (в пределах обвалования) (б)

Расчетные значения падающего теплового потоков излучения, воздействующего на наружные конструкции здания отеля, в обоих случаях превысили $20 \text{ кВт}/\text{м}^2$, что более критических значений тепловых потоков для горючих материалов [2], входящих в состав внешних конструкций здания, что свидетельствует о наличии угрозы распространения горения между рассматриваемыми объектами.

Следовательно, необходима разработка дополнительных противопожарных мероприятий, которые позволят снизить уровень теплового воздействия на горючие материалы наружных конструкций здания отеля, в случае возникновения пожара на ГРУ №15.

Уменьшение противопожарных расстояний возможно при применении противопожарных преград, удовлетворяющих требованиям ст. 37 №123 ФЗ. В качестве такой преграды может быть устройство противопожарной стены, высота и длина которой должна быть определена в результате повторного моделирования рассмотренных ранее сценариев проектных пожаров, но уже с учетом наличия между объектами предлагаемой преграды.

Противопожарная стена должна выдерживать огневое воздействие длительностью более 71,3 мин, что соответствует времени выгорания топлива в резервуарах. Указанным требованиям отвечает противопожарная стена первого типа с пределом огнестойкости REI 150.

Для выбора высоты стены необходимо рассмотреть аварийную ситуацию с разгерметизацией резервуара без мгновенного воспламенения смеси газа с воздухом. В соответствии с [4] для ситуации, когда весь газ поступил в атмосферу, высота зоны, ограничивающей область концентраций, превышающих нижний концентрационный предел распространения пламени, составит:

$$Z_{НКПР} = 0,26 \cdot \left(\frac{m_z}{\rho_z \cdot C_{НКПР}} \right)^{0,33} = 0,26 \cdot \left(\frac{17814}{1,9 \cdot 2,1} \right)^{0,33} = 1,9 \text{ м.}$$

где m_z – масса газа, поступившего в открытое пространство при пожароопасной ситуации, кг;

ρ_z – плотность газа при расчетной температуре и атмосферном давлении, кг/м³;

$C_{НКПР}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени газоздушной смеси, % об.

Радиус зоны, ограничивающей область концентраций, превышающих нижний концентрационный предел распространения пламени, равен:

$$R_{НКПР} = 7,8 \cdot \left(\frac{m_z}{\rho_z \cdot C_{НКПР}} \right)^{0,33} = 7,8 \cdot \left(\frac{17814}{1,9 \cdot 2,1} \right)^{0,33} = 58,8 \text{ м.}$$

Таким образом, в случае утечки газа из резервуара здание отеля может находиться в зоне поражения от воздействия пожара вспышки. Для предотвращения данного воздействия в качестве компенсирующего мероприятия предлагается устройство противопожарной стены, высотой не менее высоты зоны, ограничивающей область концентраций, превышающих нижний концентрационный предел распространения пламени, т.е. не менее 1,9 м с учетом коэффициента надежности 0,8.

По результатам повторного моделирования сценариев пожара полученные расчетные значения теплового потока на здание отеля при наличии противопожарной стены высотой 2,5 м между объектами составляют 10–12 кВт/м², что не превышает критических значений теплового потока для горючих материалов (ПВХ – панели стеклопакетов, материалы кровли), входящих в состав наружных конструкций здания отеля. На рисунке 3.4 приведены результаты моделирования при высоте стены 2,5 м и наличии бокового ветра равного 5 м/с в сторону здания отеля.

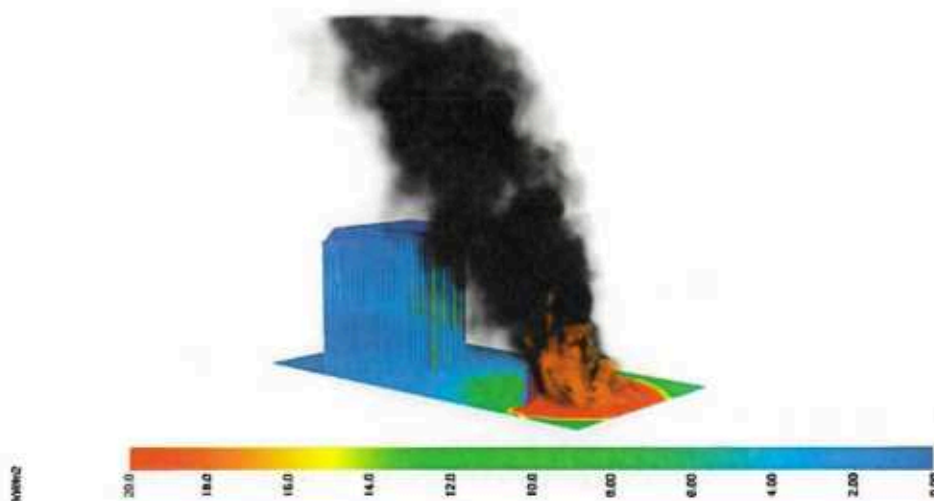


Рисунок 3.4 – Падающий тепловой поток (кВт/м²) от пожара пролива на наружные конструкции здания отеля

В случае же превышения падающим тепловым потоком на здание отеля критических значений, параметры стены должны быть изменены (например,

увеличена высота) и проведены повторные расчеты, подтверждающие ее эффективность.

В результате проведенных расчетов с разработкой дополнительных противопожарных мероприятий делается условный вывод. Например, значения падающего теплового потока на горючие материалы наружных конструкций здания отеля в случае пожара на подземных резервуарах, находящихся на расстоянии 17,8 м от здания, не превышают критических значений, необходимых для зажигания горючих материалов наружных конструкций здания, при выполнении дополнительных противопожарных мероприятий в виде устройства противопожарной стены первого типа высотой не менее 2,5 м и длиной не менее 17,5 м.

