

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ РАЗРЫВОВ МЕЖДУ ЗДАНИЯМИ С ДВУСКАТНЫМИ КРЫШАМИ, ВЫПОЛНЕННЫМИ ИЗ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Пастухов С.М., Чорный А.Д., Тетерюков А.В.

Цель. Разработать научно обоснованную инженерную методику определения противопожарных разрывов между жилыми зданиями с двускатными крышами, выполненными из горючих материалов, учитывающую форму крыши и геометрические параметры излучающей поверхности.

Методы. Анализ экспериментальных данных площади излучающей поверхности, температурных полей на расстоянии от 0,5 до 1,5 м по вертикали и горизонтали от экспериментального фрагмента двускатной кровли, а также плотности теплового потока. Численное моделирование процессов тепломассопереноса и лучистого теплообмена с помощью гидрогазодинамического решателя ANSYS Fluent.

Результаты. Установлено, что при горении фронтона кровли формируется излучающая поверхность треугольной формы, что принципиально отличается от существующей модели, применяемой в расчетах и базирующейся на прямоугольных формах излучающей поверхности. Получены экспериментальные зависимости изменения температуры, плотности теплового потока и площади излучающей поверхности от времени продолжительности пожара. Разработана численная модель расчета, позволяющая определять новые данные без проведения натурных экспериментальных исследований. Получены аналитические зависимости между геометрическими параметрами кровли и высотой излучающей поверхности.

Область применения исследований. Определение величины противопожарных разрывов между зданиями с двускатными крышами, выполненными из горючих материалов. Проектирование жилой малоэтажной застройки в части оценки противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями, а также разработка и актуализация технических нормативных правовых актов в области обеспечения пожарной безопасности. Результаты исследования представляют практический интерес для инженерных организаций, проектных институтов, сотрудников МЧС и научно-образовательных учреждений.

Ключевые слова: противопожарный разрыв, геометрические параметры пламени, угловой коэффициент облученности, экспериментальные исследования, моделирование.

(Поступила в редакцию 10 апреля 2025 г.)

Введение

В последние десятилетия на территории Республики Беларусь наблюдается устойчивая тенденция к росту плотности малоэтажной индивидуальной застройки, особенно в пригородных и сельских населенных пунктах. Такие здания, как правило, возводятся с применением недорогих и технологичных строительных материалов, среди которых преобладают конструкции, выполненные с использованием таких горючих материалов, как древесина, древесно-стружечные плиты, горючие утеплители, мягкие битумные черепицы и полимерные покрытия. Применение указанных строительных материалов обеспечивает ряд преимуществ: стоимость, доступность и скорость монтажа. Вместе с тем формируют высокую пожарную нагрузку, особенно в конструкциях крыш.

Анализ количества пожаров за 2015–2024 гг., приведших к повреждению или уничтожению двух и более зданий в жилой застройке вследствие несоблюдения противопожарных разрывов, согласно данным базы ПК «Учет ЧС»¹ и приказу МЧС Республики Беларусь от

¹ База данных ПК «Учет ЧС» / Систем треб. PostgreSQL 9.6 (дата обращения: 25.02.2025).

19 сентября 2019 г. № 282² показал, что в целом за рассматриваемый период среднегодовое значение составило 462 пожара в год. Это свидетельствует о системном характере проблемы и устойчивой тенденции к быстрому распространению огня между строениями в жилом секторе (рис. 1).

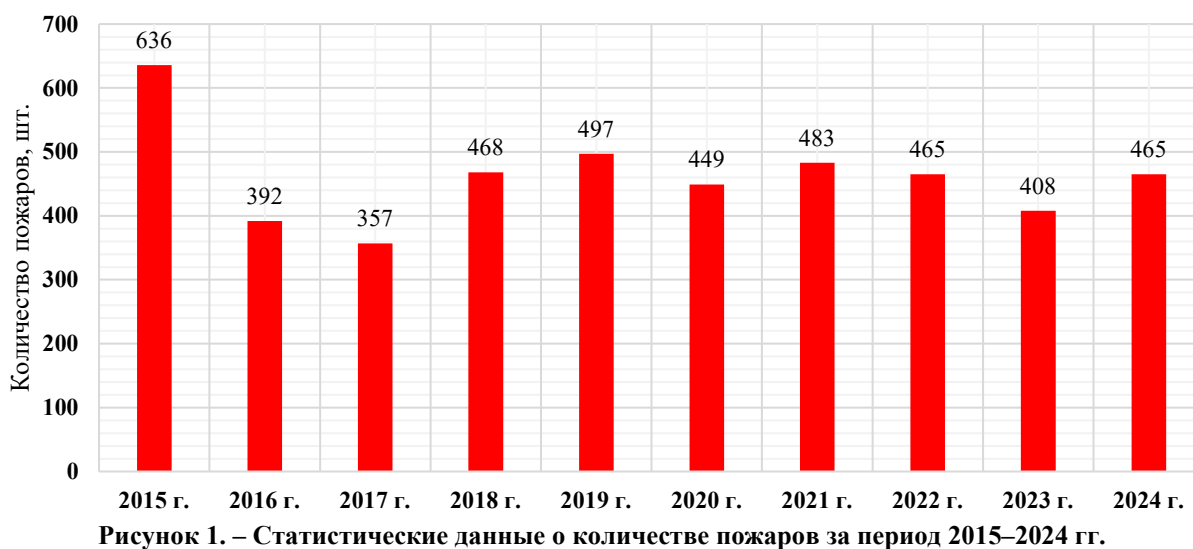


Рисунок 1. – Статистические данные о количестве пожаров за период 2015–2024 гг.

Анализ значений потерь показывает, что в среднем прямые потери составляли основную долю общего ущерба – около 59 %, а косвенные потери (в том числе связанные с непригодностью дальнейшей эксплуатации здания/сооружения, потерей имущества и т.п.) – оставшиеся 41 %. Среднегодовые общие экономические потери за десятилетие составили приблизительно 5919 тыс. руб., в том числе прямые и косвенные потери – 4396 и 1513 тыс. руб. соответственно (рис. 2).

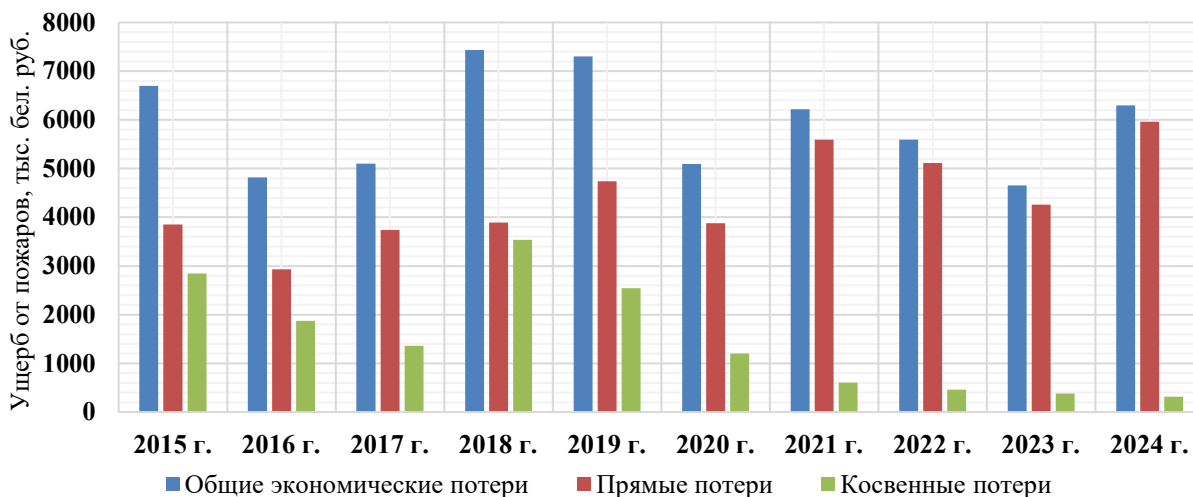


Рисунок 2. – Экономические потери от пожаров за период 2015–2024 гг.

Эти данные подтверждают, что пожары с возгоранием одновременно нескольких строений представляют собой не только повышенную угрозу для плотной жилой застройки, но и значительную экономическую нагрузку для собственников и государства.

На данный момент в практике обеспечения пожарной безопасности зданий применяются три основных метода определения противопожарных разрывов: табличный, аналитический (инженерный) [1] и метод численного моделирования (полевой метод моделирования

² Об учете пожаров и последствий от них в органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь: приказ М-ва по чрезвычайн. ситуациям Респ. Беларусь, 19 сент. 2019 г., № 282. – Минск: МЧС Респ. Беларусь, 2019. – 70 с.

пожаров) [2; 3]. Каждый из них обладает достоинствами и недостатками, областью применения и ограничениями.

Табличный метод основывается на заранее установленных значениях расстояний между зданиями, дифференцированных в общем случае по степени огнестойкости и классу функциональной пожарной опасности. Указанный подход изложен в СН 2.02.05-2020³ и СП 4.13130.2013⁴. Элементы табличного метода встречаются в рекомендациях NFPA 80A⁵, в котором предлагаются значения противопожарных разрывов в зависимости от степени воздействия пожара на конструктивные характеристики зданий. В странах Европы такие таблицы чаще входят в национальные документы, например DTU 20.12⁶ (Франция), но почти всегда сочетаются с возможностью проведения расчета. Табличные данные чаще используются для предварительного проектирования. Данный метод, с одной стороны, является простым в применении, с другой стороны, не учитывает особенности застройки и является достаточно консервативным.

Аналитический (инженерный) метод предусматривает расчет интенсивности теплового излучения от горящего объекта на соседнее здание. При расчете критической плотности теплового потока учитывается угловой коэффициент облученности от излучающей поверхности. Суть метода заключается в определении значения падающего теплового потока и сравнении его со значением критической плотности теплового потока для горючих материалов на принимающей поверхности, способной вызвать возпламенение и, как следствие, распространение пожара на соседние здания и сооружения. Такие подходы изложены в различных отечественных методиках: СН 2.01.03-2019⁷, СТБ 11.05.03-2010⁸, М.Я. Ройтман [4, с. 317–341] и В.Ф. Кудаленкин [5, с. 179–194]; и зарубежных методиках: R. Chitty [6, с. 27–39], D. Drysdale [7, с. 53–74], В. Karlsson и J. Quintiere [8, с. 171–184], Е. Carlsson [9, с. 9–14], М. Law [10]. Аналитический метод позволяет оценивать противопожарные разрывы, учитывая индивидуальные особенности объектов, однако имеет ограничения и упрощения для удобства расчета. Как и табличный метод, в большинстве случаев приводит к завышенной оценке расчетных значений.

Метод численного моделирования, как правило, применяется для сложных объектов или плотной застройки и включает использование программных комплексов (например, FDS, PyroSim, Ansys и др.), позволяющих моделировать развитие пожара и тепловое воздействие на соседние здания и сооружения. Примеры использования данного подхода изложены в работах [11; 12]. Метод имеет высокую точность, учитывает множество факторов: геометрические особенности здания, воздействие ветра, количество проемов, используемые строительные материалы и др. Вместе с тем для реализации данного метода требуется процедура валидации, включающая проведение натурных экспериментальных исследований.

³ Пожарная безопасность зданий и сооружений. Строительные нормы Республики Беларусь: СН 2.02.05-2020. – Введ. 12.05.2020. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2020. – 70 с.

⁴ Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям. Свод правил системы противопожарной защиты: СП 4.13130.2013. – Введ. 24.04.2013 приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий от 24.04.2013 № 288. – 187 с.

⁵ Guide for Protection of Buildings from Exterior Fire Exposure: NFPA 80A. – 2017. – Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2017. – 24 p.

⁶ Gros œuvre en maçonnerie des toitures destinées à recevoir un revêtement d'étanchéité: NF DTU 20.12. – 2012. – Paris: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 2012. – 70 p.

⁷ Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости. Строительные нормы Республики Беларусь: СН 2.01.03-2019. – Введ. 16.12.2019. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2020. – 38 с.

⁸ Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная безопасность технологических процессов. Методы оценки и анализа пожарной опасности. Общие требования: СТБ 11.05.03-2010. – Введ. 28.04.10. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2010. – 76 с.

Таким образом, можно сделать вывод, что на сегодня отсутствует универсальная методика, позволяющая оценить значение плотности теплового потока от горящей двускатной кровли с учетом ее геометрических параметров и применить результаты оценки при определении противопожарных разрывов между зданиями. При этом такие кровли широко распространены в малоэтажной жилой застройке Республики Беларусь. Отсутствие соответствующих подходов делает невозможным достоверно оценить противопожарные разрывы, что ставит под угрозу безопасность населения. С учетом изложенного проведение комплексного исследования, включающего натурное экспериментальное изучение горения фрагмента двускатной кровли, моделирование процессов тепломассопереноса и лучистого теплообмена, а также разработка инженерной методики определения противопожарных разрывов, учитывающей горение двускатной кровли, является актуальным и практически значимым. Результаты такого исследования могут быть использованы в качестве основы для обновления нормативного регулирования противопожарных требований для малоэтажной застройки в Республике Беларусь.

Основная часть

Экспериментальные исследования. С целью получения новых данных о распределении температур и плотности теплового потока, а также температуры и геометрических параметров излучающей поверхности при горении двускатной кровли, выполненной из горючих материалов, были проведены натурные экспериментальные исследования (рис. 3). Подробная методика проведения данных исследований изложена в [13].

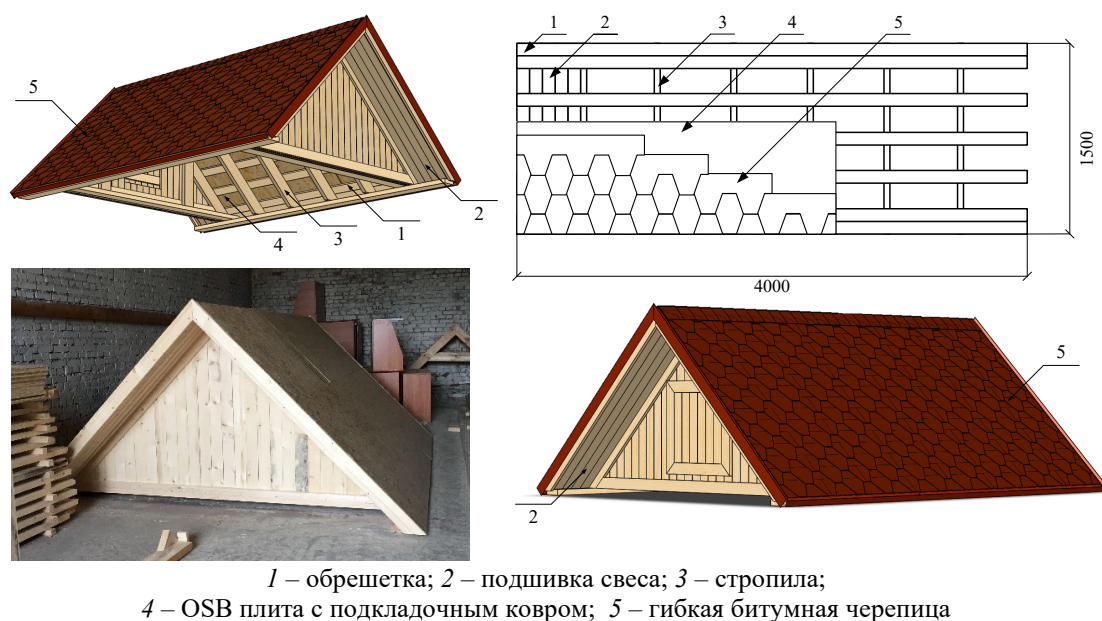


Рисунок 3. – Экспериментальный фрагмент двускатной кровли, выполненной из горючих материалов

Для повышения достоверности получаемых данных выполнено четыре последовательных идентичных эксперимента, проведенных при одинаковых условиях, с применением однотипного фрагмента двускатной кровли и повторяющейся схемы измерений. Сопоставление результатов показало высокую степень воспроизводимости тепловизионных изображений, температурных графиков и значений плотности теплового потока.

На основании анализа полученных тепловизионных изображений установлено, что при горении фронтона экспериментального фрагмента формируется излучающая поверхность треугольной формы, при горении ската кровли – излучающая поверхность принимает прямоугольную конфигурацию. Указанные геометрические формы являются ключевыми

при расчете плотности теплового потока на соседние объекты, в том числе в рамках определения величин противопожарных разрывов. Согласно существующим нормативным методикам прямоугольная модель излучающей поверхности широко применяется в расчетах и теоретических моделях, в то время как треугольная форма пламени ранее не рассматривалась как обоснованная геометрия излучающей поверхности. Полученные экспериментальные зависимости изменения площади излучающей поверхности от времени представлены на рисунке 4. Для сопоставления результатов экспериментальных значений площади излучающей поверхности на график нанесены две постоянные величины: расчетная площадь излучающей поверхности для фронтона кровли $4,5 \text{ м}^2$, принимаемая в расчетах как прямоугольник, и площадь проекции фронтона $2,25 \text{ м}^2$, соответствующая треугольной конфигурации.

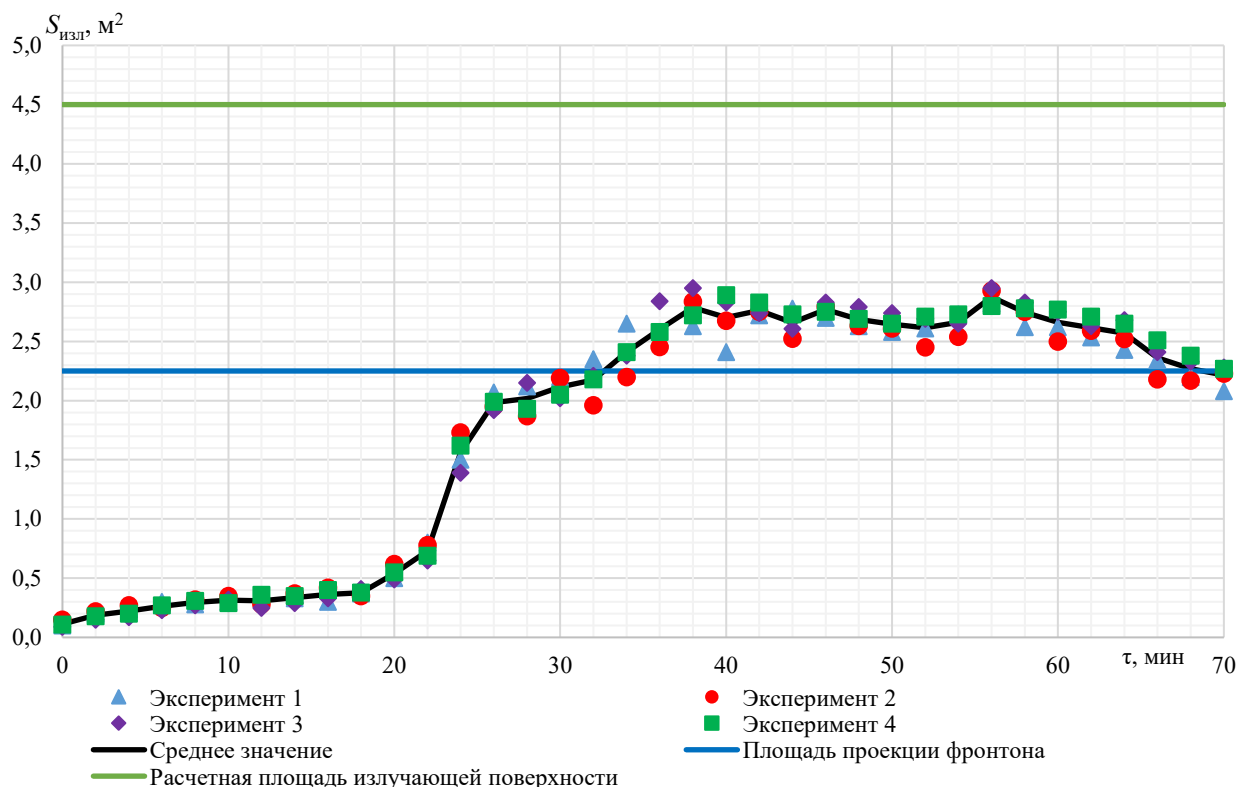


Рисунок 4. – Зависимость изменения площади излучающей поверхности от времени пожара

Экспериментальные значения площади излучающей поверхности превышают площадь вертикальной проекции фронтона после 32-й мин, однако значительно ниже расчетной площади излучающей поверхности. Площадь излучающей поверхности увеличивается до максимальных значений, достигающих порядка $3,0 \text{ м}^2$. Далее наблюдается ее стабилизация и последующее снижение, обусловленное частичным выгоранием горючих материалов экспериментального фрагмента.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют необходимость учета различных геометрических форм излучающей поверхности при расчетах углового коэффициента облученности. На основании вышеизложенного была разработана математическая модель определения углового коэффициента облученности для расчета плотности теплового потока от излучателя плоской формы, изложенная в работах [14; 15].

В рамках экспериментального исследования проводилась регистрация температурных полей на расстояниях (от 0,5 до 1,5 м по горизонтали и вертикали) от горящего фрагмента двускатной кровли. На рисунке 5 представлена кривая, которая показывает максимальные экспериментальные значения температуры, измеренной термоэлектрическим преобразователем, находившимся на расстоянии 1,0 м по вертикали и горизонтали от исследуемого объекта.

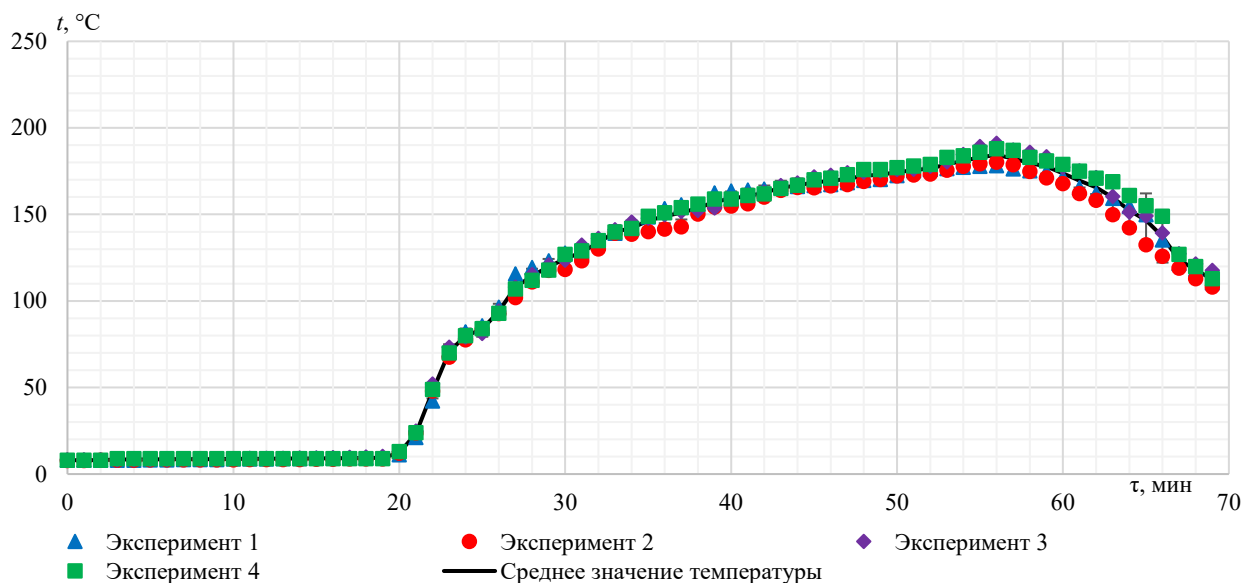


Рисунок 5. – Экспериментальные значения температур на расстоянии 1,0 м по вертикали и горизонтали от экспериментального фрагмента

Максимальное значение температуры от термоэлектрического преобразователя составило 184 ± 4 °C, данное значение было зафиксировано на 55-й мин проведения экспериментального исследования. После 55-й мин началось снижение температуры, т.к. уменьшалась площадь излучающей поверхности из-за выгорания горючих материалов конструкции фрагмента.

На рисунке 6 представлены экспериментальные данные о плотности теплового потока, зафиксированные при горении фронтона экспериментального фрагмента двускатной кровли. Датчик измерения плотности теплового потока и термоэлектрический преобразователь располагались на одинаковом расстоянии от экспериментального фрагмента.

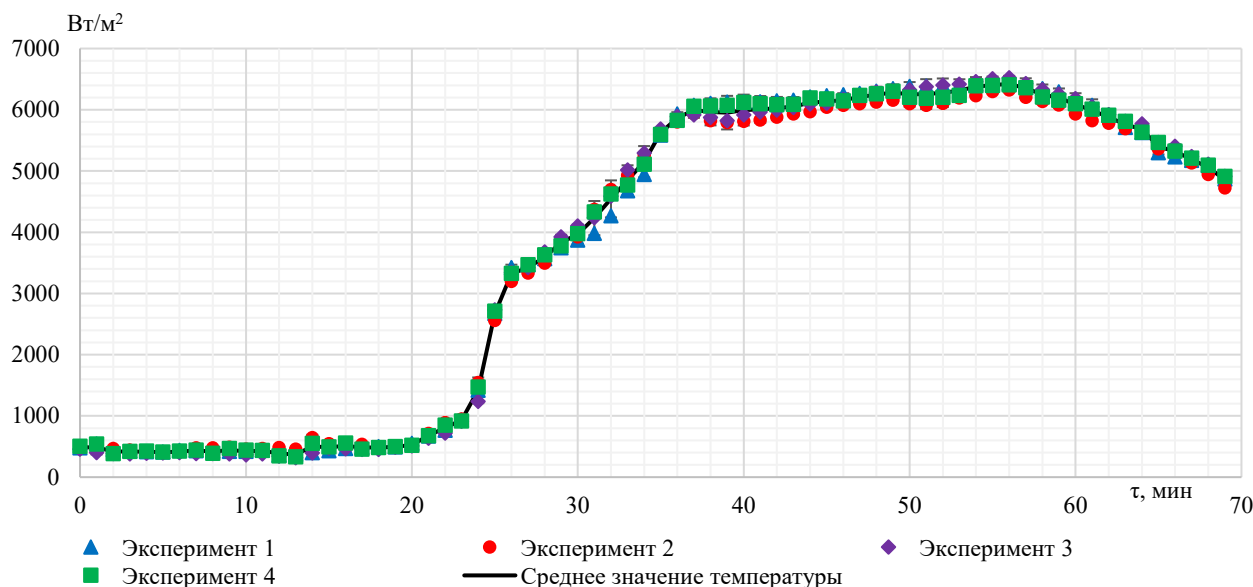


Рисунок 6. – Экспериментальные значения плотности теплового потока на расстоянии 1,0 м по вертикали и горизонтали от экспериментального фрагмента

При горении фронтона экспериментального фрагмента плотность теплового потока постепенно увеличивалась, достигая максимальных значений 6524 ± 131 Вт/м² на 55–57-й мин эксперимента. После достижения максимума наблюдается плавное снижение плотности теплового потока, что может быть обусловлено постепенным снижением интенсивности горения и выгоранием горючей нагрузки.

Для распространения результатов натурных экспериментальных исследований на другие возможные случаи, учитывающие различные геометрические размеры и угол наклона двускатных кровель, проведено численное моделирование с последующим сравнительным анализом результатов моделирования и экспериментальных данных. Это позволит уточнить и верифицировать расчетные методики, а также повысить точность определения противопожарных разрывов между зданиями.

Численное моделирование. Для этого разработана трехмерная физико-математическая модель нестационарного тепломассопереноса в условиях открытого горения, учитывающая геометрию экспериментального фрагмента и свойства горючих материалов, использованных для его возведения. Моделирование выполнено с помощью гидрогазодинамического решателя ANSYS Fluent [16; 17], в частности моделью тепломассопереноса при горении. Набор математических зависимостей, включенных в модель, представлен на схеме (рис. 7).



Рисунок 7. – Описание математической модели

В основу численного расчета положен метод RANS, который предполагает решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса и уравнения неразрывности [16]. Для неизоотермических потоков реагирующих многокомпонентных газов с учетом пульсаций плотности вместо осреднения по Рейнольдсу применяется осреднение по Фавру. Дополнительными для решения являются уравнение для удельной энергии и уравнение переноса концентрации продуктов сгорания [16]. Учет турбулентности осуществлялся определением рейнольдсовых напряжений и турбулентных тепловых и концентрационных потоков через запись дополнительных дифференциальных уравнений для характеристик турбулентности с применением гипотезы о турбулентной вязкости и диффузии [17]. Также использовалась SST $k-\omega$ модель турбулентности Ментера (модель переноса сдвиговых напряжений Ментера) [18].

Система уравнений модели может быть представлена в виде (применяется суммирование по повторяющемуся индексу. Например, в производной $\partial(\rho u_j)/\partial x_j$ следующей формулы повторяется индекс j , поэтому запись $\partial(\rho u_j)/\partial x_j$ обозначает сумму $\sum_{j=1}^3 \partial(\rho u_j)/\partial x_j$):

– уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

где ρ – осредненная плотность газа, м;

t – время, с;

x_j – декартовы координаты 3-мерного пространства ($j = 1..3$), м;

– уравнения движения

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\tau_{ij} + \tilde{\tau}_{ij})}{\partial x_j} + \rho g_i, \quad i = 1..3, \quad (2)$$

где u_i – компоненты вектора осредненной (по Фавру) скорости, м/с;

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) - \text{осредненный тензор вязких напряжений, Па;}$$

$$\tilde{\tau}_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - \text{осредненный тензор турбулентных напряжений, Па;}$$

μ и μ_t – динамическая и турбулентная вязкость, Па·с;

k – кинетическая энергия турбулентности (КЭТ), м²/с²;

δ_{ij} – символ Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ при $i = j$, и $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$);

g_i – координаты вектора ускорения свободного падения, м/с²;

уравнения SST k - ω модели Ментера (1994) [18]:

– уравнение кинетической энергии турбулентности k

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; \quad (3)$$

– уравнение удельной скорости диссипации ω (1/с)

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \gamma \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}. \quad (4)$$

В этих уравнениях генерация турбулентной энергии P_k (кг/(м·с³)), турбулентная вязкость μ_t и функции смешивания F_1 и F_2 определяются по формулам:

$$P_k = \tilde{\tau}_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad \mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (a_1 = 0,31), \quad F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad \text{и} \quad F_2 = \tanh(\arg_2^2),$$

где Ω – интенсивность скорости деформации, 1/с;

$$\arg_1 = \min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \mu}{y^2 \omega \rho} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right), \quad \arg_2 = \max \left(\frac{2 \sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \mu}{y^2 \omega \rho} \right);$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right);$$

y – расстояние от точки потока до ближайшей поверхности, м.

Константы модели β , σ_k , σ_ω и γ вычисляются из соответствующих констант по формуле $\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2$:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 0,075; & \sigma_{k1} &= 0,85; & \sigma_{\omega 1} &= 1; \\ \beta_2 &= 0,0828; & \sigma_{k2} &= 1; & \sigma_{\omega 2} &= 0,856; \end{aligned}$$

$$\gamma_1 = \beta_1 / \beta^* - \sigma_{\omega 1} \kappa^2 / \sqrt{\beta^*} \quad \text{и} \quad \gamma_2 = \beta_2 / \beta^* - \sigma_{\omega 2} \kappa^2 / \sqrt{\beta^*} \quad \text{при} \quad \beta^* = 0,09 \quad \text{и} \quad \kappa = 0,41;$$

– уравнение энергии в терминах тепловой энтальпии h (Дж/кг)

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j h)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right] \frac{\partial h}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{q}_j^R}{\partial x_j}; \quad (5)$$

– уравнение для концентрации компонент газа Y_l (кг/м³), $l = 1..N$,

$$\frac{\partial(\rho Y_l)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j Y_l)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right] \frac{\partial Y_l}{\partial x_j} + S_l; \quad (6)$$

– уравнение для концентрации сажи S (кг/м³)

$$\frac{\partial(\rho S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j S)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right] \frac{\partial S}{\partial x_j} + S_s, \quad (7)$$

где Pr , Sc и Pr_t , Sc_t – молекулярные и турбулентные числа Прандтля и Шмидта соответственно;

\dot{q}_j^R – тепловой поток за счет лучистого теплообмена, Вт/м² [16];

S_l и S_s – осредненные скорости химических реакций образования продуктов сгорания и сажи, кг/(м³·с) [16].

Система уравнений должна быть дополнена уравнением состояния газа

$$p = R\rho T \sum_{i=1}^N Y_i / M_i, \quad (8)$$

где $R = 8,314$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; T – температура, К; M_i – молярная масса газовых компонент, кг/моль.

Для расчета лучистого теплопереноса применена модель S2S (Surface-to-Surface), описывающая обмен лучистой энергией между двумя поверхностями [16]. Геометрические параметры (длина, ширина, высота и угол наклона скатов) и состав конструктивных элементов кровли (битумная черепица, подкладочный ковер, плита OSB, стропильная система и другие конструктивные элементы, выполненные из древесины) заданы в соответствии методикой, изложенной в работе [13].

Скорость образования сажи учитывалась на основе одношаговой модели ее образования с использованием эмпирической зависимости скорости образования сажи, справедливой для турбулентного горения углеводородов [16; 19].

Численный расчет производился с привлечением сеточного метода. В связи с этим расчетная область разбивалась на множество объемных сеточных ячеек конечного размера, совокупность которых представляет собой расчетную сетку. При этом первоначально расчетная область разбивалась на элементы в виде тетраэдров или параллелепипедов, однако для трехмерной постановки задачи производилось преобразование тетраэдральной сетки в полихедральную сетку, где в качестве элементов выступают ячейки в виде многогранников. Такой подход необходим для уменьшения количества расчетных ячеек и ускорения процесса счета. Процедура перевода в другой тип ячеек привела к тому, что первоначальная сетка, содержащая 21,3 млн ячеек, уменьшилась до 6,28 млн ячеек. Кроме того, использование полихедральных ячеек приводит к лучшей сходимости численного метода с меньшими невязками.

В результате моделирования получены значения плотности теплового потока и значения температур на расстояниях (от 0,5 до 1,5 м по горизонтали и вертикали), а также площади излучающей поверхности. Для сравнительного анализа экспериментальные данные и значения, полученные при моделировании, сведены в таблицу 1.

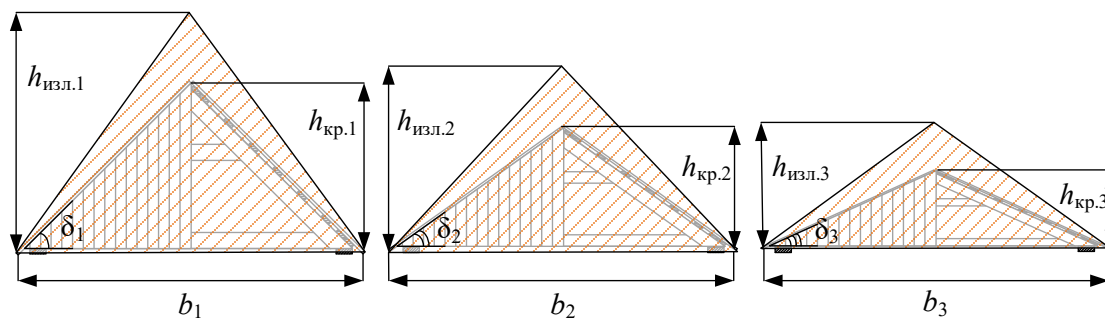
Таблица 1. – Сопоставление результатов эксперимента и численного моделирования

№ п/п	Рассматриваемый параметр	Эксперимент	Моделирование	Расхождение относительно экспериментальных данных, %
1	Максимальное значение плотности теплового потока, Вт/м ²	6524±131	7483	14,70
2	Максимальное значение температуры на расстоянии 1 м по вертикали и горизонтали от экспериментального образца, К	457±4	480	5,03
3	Максимальная площадь излучающей поверхности, м ²	2,99	3,33	11,37

Таким образом, разработанная модель подтверждает высокую степень соответствия расчетных данных экспериментальным значениям, что позволяет использовать ее при расчете других конструкций с различными углами наклона скатов и геометрическими размерами крыши. Это, в свою очередь, позволяет применять разработанную модель при

инженерной оценке противопожарных разрывов, а также для прогнозирования теплового воздействия на соседние здания и сооружения.

Далее с использованием разработанной численной модели тепломассопереноса, реализованной в ANSYS Fluent, проведен расчет для ряда геометрически различающихся конфигураций двускатной кровли, выполненной из горючих материалов. В расчетах варьировались следующие параметры: ширина и высота фронтона кровли. Принципиальная схема влияния рассматриваемых геометрических параметров приведена на рисунке 8.



b_1, b_2, b_3 – ширина фронтона, м; $h_{кр.1}, h_{кр.2}, h_{кр.3}$ – высота фронтона, м;
 $h_{изл.1}, h_{изл.2}, h_{изл.3}$ – высота излучающей поверхности; $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – угол наклона ската кровли

Рисунок 8. – Схема определения высоты излучающей поверхности

По результатам моделирования была установлена эмпирическая зависимость (9), связывающая высоту излучающей поверхности $h_{изл}$ (м) с основными геометрическими параметрами двускатной кровли.

$$h_{изл} = k_{h_{изл}}(h_{кр}, b) \cdot h_{кр}, \quad (9)$$

где $h_{кр}$ и b – высота и ширина фронтона кровли, м;

$k_{h_{изл}}(h_{кр}, b)$ – коэффициент, учитывающий геометрические размеры кровли.

Таким образом, численное моделирование позволило количественно описать влияние геометрических параметров двускатной кровли на геометрические параметры излучающей поверхности, что важно для обоснования и проектирования противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями.

Инженерная методика. На основании результатов проведенных экспериментальных исследований и численного моделирования разработана методика определения противопожарных разрывов между жилыми зданиями с двускатными крышами, выполненными из горючих материалов, учитывающая форму крыши и геометрические параметры излучающей поверхности. Указанная методика отличается от существующих тем, что позволяет рассчитывать излучающие поверхности различной формы (рис. 9).

Представленная методика включает несколько блоков: определение исходных данных, анализ геометрических параметров, расчет теплового воздействия и оценку выполнения условия пожарной безопасности.

На первом этапе проводится сбор геометрических исходных данных: ширина фронтона b (м), длина ската a (м) и высота кровли h (м). А также определяются теплофизические параметры:

– критическая плотность теплового потока $q_{кр}$ (Вт/м²) для принимающей поверхности на смежном объекте. Принимается по существующим справочным данным либо на основе экспериментально полученных значений;

– температура излучающей поверхности $T_{ф}$ (К) может быть получена по результатам моделирования или принята по существующим расчетным методикам;

– температура воспламенения принимающей поверхности $T_{в}$ (К) определяется по справочным данным в зависимости от веществ и материалов, на которые воздействует лучистый тепловой поток, либо определена экспериментально согласно [13];

– степень черноты пламени ε_{ϕ} и степень черноты принимающей поверхности ε_{π} определяются по существующим методикам и справочным данным.

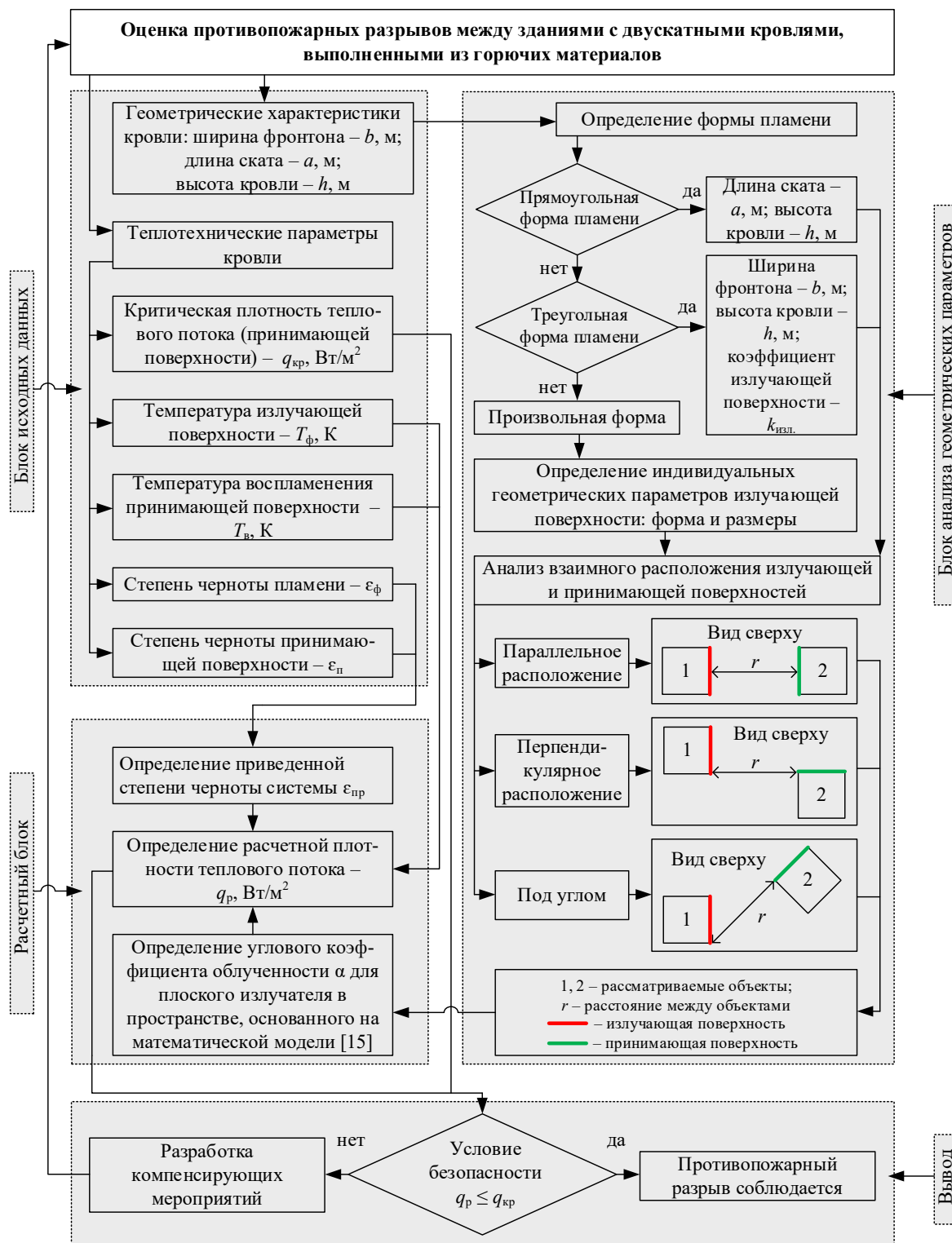


Рисунок 9. – Методика определения противопожарных разрывов между зданиями с двускатными кровлями, выполненными из горючих материалов

На следующем этапе определяется форма пламени (прямоугольная, треугольная или произвольная), например, при исследовании экспериментальных данных). В зависимости от формы пламени задаются соответствующие геометрические параметры излучающей поверхности. В частности, при горении ската кровли излучающая поверхность будет определяться

как вертикальная проекция в форме прямоугольника, в свою очередь, фронтон – треугольник, высота которого определяется на основании выражения (9). Затем проводится анализ пространственного расположения объектов (параллельно, перпендикулярно или под углом) относительно друг друга. В соответствии с пространственным расположением на математической модели плоского излучателя [15] рассчитывается угловой коэффициент облученности α .

Далее формируется расчетный блок, в котором на основе теплотехнических параметров и значения углового коэффициента облученности определяется расчетная плотность теплового потока q_p (Вт/м²). На заключительном этапе осуществляется проверка соблюдения условия безопасности – выполнение неравенства $q_p \leq q_{кр}$, при положительном результате противопожарный разрыв признается достаточным, при отрицательном – необходима разработка компенсирующих мероприятий: изменение геометрических параметров кровли, замена материалов конструкции и др. Абсолютно все предложенные мероприятия приведут к изменению исходных данных, поэтому необходимо определять достаточность противопожарного разрыва заново.

Заключение

В результате выполненного комплексного исследования, включающего натурные экспериментальные исследования и численное моделирование процессов тепломассопереноса и лучистого теплообмена при горении фрагмента двускатной кровли, выполненной из горючих материалов, получены новые научно обоснованные данные, необходимые для совершенствования методики расчета противопожарных разрывов.

В ходе экспериментальных исследований были установлены зависимости распределения температурных полей на расстояниях от 0,5 до 1,5 м по горизонтали и вертикали от горящего объекта, а также получены значения площади излучающей поверхности пламени и плотности теплового потока от времени при горении фронтона и ската исследуемого объекта. Доказано, что при горении фронтона кровли формируется излучающая поверхность в форме треугольника, в отличие от традиционно используемой в расчетах прямоугольной формы.

Разработана инженерная методика оценки противопожарных разрывов между жилыми зданиями с двускатными кровлями, выполненными из горючих материалов (основание из древесины и гибкая битумная черепица). Методика учитывает влияние геометрических параметров кровли (высоту и ширину), основана на экспериментально полученном коэффициенте высоты излучающей поверхности и угловом коэффициенте облученности для плоского излучателя в пространстве.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих зданий малоэтажной жилой застройки, а также при разработке технических нормативных правовых актов в области обеспечения пожарной безопасности.

Геометрические параметры и формы излучающих поверхностей при горении ската и фронтона двускатной кровли были определены в ходе моделирования, выполненного в рамках проекта Ф24М-029 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (государственная регистрация № 20241248).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пастухов, С.М. Анализ подходов по оценке минимально допустимых расстояний между зданиями при воздействии пожара / С.М. Пастухов, С.М. Жамойдик, А.В. Тетерюков // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – № 2 (20). – С. 23–31. – EDN: SWENLV.
2. Cox, G. Combustion fundamentals of fire / G. Cox. – London: Academic Press, 1995. – 476 p.

3. Пузач, С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 150 с.
4. Ройтман, М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве / М.Я. Ройтман. – М.: Стройиздат, 1985. – 590 с.
5. Пожарная профилактика в строительстве: учебник / Б.В. Грушевский [и др.]; под ред. В.Ф. Кудаленкина. – М., 1985. – 454 с.
6. Chitty, R. External fire spread: building separation and boundary distances; 2nd ed. / R. Chitty. – Garston, Watford: Building Research Establishment, 2014. – 68 p. – ISBN 9781848063198.
7. Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics / D. Drysdale. – Chichester: University of Edinburgh, 1999. – 470 p.
8. Karlsson, B. Enclosure Fire Dynamics / B. Karlsson, J.G. Quintiere. – Boca Raton: CRC Press, 2000. – 316 p.
9. Carlsson, E. External fire spread to adjoining buildings – A review of fire safety design guidance and related research / E. Carlsson. – Lund: Department of Fire Safety Engineering Lund University, 1999. – 125 p.
10. Law, M. Heat radiation from fires and building separation distance. Fire Research Technical Paper No. 5 / M. Law. – London: Her Majesty's Stationery Office, 1963. – 45 p.
11. Pesic, D. Simulation of fire spread between residential buildings regarding safe separation distance / D. Pesic, D. Zigar, M. Raos, I. Anghel // Technical gazette. – 2017. – Vol. 24, No. 4. – P. 1137–1145. – DOI: 10.17559/TV-20150923233514.
12. Edalati-Nejad, A. Numerical simulation of the effect of fire intensity on wind driven surface fire and its impact on an idealized building / A. Edalati-Nejad, M. Ghodrat, S.A. Fanaee, A. Simeoni // Fire. – 2022. – Vol. 5, No. 1. – Article 17. – 18 p. – DOI: 10.3390/fire5010017.
13. Пастухов, С.М. Методика проведения экспериментальных исследований по определению геометрических параметров пламени при горении кровельных материалов / С.М. Пастухов, А.В. Тетерюков // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 2. – С. 176–185. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.176. – EDN: XPAHID.
14. Пастухов, С.М. Математическая модель определения углового коэффициента облученности при расчете противопожарных разрывов между зданиями с двускатными кровлями, выполненными из горючих материалов / С.М. Пастухов, А.С. Платонов, А.В. Тетерюков, А.С. Дробыш // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2021. – Т. 1, № 1. – С. 93–103. – DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.93. – EDN: DBRUSN.
15. Пастухов, С.М. Математическая модель определения углового коэффициента облученности для расчета плотности теплового потока от излучателя плоской формы / С.М. Пастухов, А.С. Платонов, А.В. Тетерюков, А.С. Дробыш // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2025. – Т. 9, № 1. – С. 5–20. – DOI: 10.33408/2519-237X.2024.9-1.5. – EDN: DIVTKW.
16. Снегирев, А.Ю. Теоретические основы пожаро- и взрывобезопасности / А.Ю. Снегирев, В.А. Талалов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 215 с.
17. Wilcox, D.C. Turbulence modeling for CFD / D.C. Wilcox. – La Canada, California: DCW Industries Inc, 1998. – 537 p.
18. Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications / F.R. Menter // AIAA Journal. – 1994. – Vol. 32, No. 8. – P. 1598–1605. – DOI: 10.2514/3.12149.
19. Hankalin, V. On thermal properties of a pyrolysing wood particle / V. Hankalin, T. Ahonen, R. Raiko // Proc. of Finnish-Swedish Flame Days 2009, January 28–29, 2009, Naantali, Finland. – 16 p.

**Инженерная методика определения противопожарных разрывов между зданиями
с двускатными крышами, выполненными из горючих материалов**

**Engineering method for determining fire safety spacing between buildings
with gable roofs made of combustible materials**

Пастухов Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент
ООО «ССПЭБ» (Союз специалистов
промышленной и экологической
безопасности), главный специалист
по пожарной безопасности, гражданской
обороне и чрезвычайным ситуациям
Адрес: Новинский бульвар, 31,
123242, г. Москва, Россия
Email: plamennyj98@gmail.com
SPIN-код: 3018-2219

Sergey M. Pastukhov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Limited Liability Company «SSPEB»
(Union of Industrial and Environmental
Safety Specialists), Chief Specialist
in Fire Safety, Civil Defense,
and Emergency Situations
Address: Novinsky boulevard, 31,
123242, Moscow, Russia
Email: plamennyj98@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1437-1913

Чорный Андрей Дмитриевич

кандидат физико-математических наук,
доцент
Государственное научное учреждение
«Институт тепло- и массообмена имени
А.В. Лыкова Национальной академии
наук Беларуси», лаборатория турбулентности,
заведующий лабораторией
Адрес: ул. П. Бровки, 15,
220072, г. Минск, Беларусь
Email: anchor@hmti.ac.by
SPIN-код: 7604-9094

Andrey D. Chorny

PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor
State Scientific Institution
«A.V. Luikov Institute of Heat and Mass
Transfer of the National Academy of Sciences
of Belarus», Turbulence Laboratory,
Head of Laboratory
Address: P. Brovki str., 15,
220072, Minsk, Belarus
Email: anchor@hmti.ac.by
ORCID: 0000-0003-4716-6123
ScopusID: 14048109000

Тетерюков Алексей Васильевич

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
пожарной безопасности, доцент
Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь
Email: teter9212@gmail.com
SPIN-код: 4855-1354

Aleksey V. Teteryukov

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Safety, Associate Professor
Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus
Email: teter9212@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7405-5774

ENGINEERING METHOD FOR DETERMINING FIRE SAFETY SPACING BETWEEN BUILDINGS WITH GABLE ROOFS MADE OF COMBUSTIBLE MATERIALS

Pastukhov S.M., Chorny A.D., Teteryukov A.V.

Purpose. To develop a scientifically grounded engineering method for determining fire separation distances between residential buildings with gable roofs made of combustible materials, taking into account the shape of roof and geometric parameters of the radiating surface.

Methods. Analysis of experimental data on the area of the radiating surface, temperature fields at distances ranging from 0.5 to 1.5 m both vertically and horizontally from an experimental fragment of a gable roof, as well as heat flux density. Numerical simulation of heat and mass transfer and radiative heat exchange processes using the ANSYS Fluent computational fluid dynamics solver.

Findings. It was found that during the combustion of the gable end, a triangular radiating surface is formed, which fundamentally differs from the existing calculation model based on rectangular radiating surfaces. Experimental dependencies were obtained for the variation of temperature, heat flux density, and radiating surface area over the duration of the fire. A numerical calculation model was developed, enabling the acquisition of new data without full-scale fire tests. Analytical relationships were established between the geometric parameters of the roof and the height of the radiating surface.

Application field of research. Determination of the size of fire safety spacing between buildings with gable roofs made of combustible materials. Design of low-rise residential buildings, in terms of assessing fire safety spacing between buildings and structures, as well as the development and updating of technical regulatory legal acts in the field of fire safety. The results of the study are of practical interest to engineering organisations, design institutes, workers of the Ministry for Emergency Situations, and scientific and educational institutions.

Keywords: fire safety spacing, geometric parameters of flame, configuration factor, experimental studies, modeling.

(The date of submitting: April 10, 2025)

REFERENCES

1. Pastukhov S.M., Zhamoydik S.M., Teteryukov A.V. Analiz podkhodov po otsenke minimal'no dopustimyykh rasstoyaniy mezhdu zdaniyami pri vozdeystvii pozhara [Analysis approaches for the assessment minimum distance between the buildings at the case of fire exposure]. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2014. No. 2 (20). Pp. 23–31. (rus). EDN: SWENLV.
2. Cox G. *Combustion fundamentals of fire*. London: Academic Press, 1995. 476 p.
3. Puzach S.V. *Metody rascheta teplomassoobmena pri pozhare v pomeshchenii i ikh primeneniye pri reshenii prakticheskikh zadach pozharovzryvobezopasnosti* [Methods for calculating heat and mass transfer during indoor fires and their application to practical fire and explosion safety tasks]. Moscow: Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia, 2005. 150 p. (rus)
4. Roytman M.Y. *Protivopozharnoe normirovanie v stroitel'stve* [Fire safety regulation in construction]. Moscow: Stroyizdat, 1985. 590 p. (rus)
5. Grushevskiy B.V., Yakovlev A.I., Krivosheev I.N., Shurin E.T., Klimushin N.G. *Pozharnaya profilaktika v stroitel'stve* [Fire prevention in construction]: textbook. Ed. by V.F. Kudalenkin. Moscow, 1985. 454 p. (rus)
6. Chitty R. *External fire spread: building separation and boundary distances*. 2nd ed. Garston, Watford: Building Research Establishment, 2014. 68 p. ISBN 9781848063198.
7. Drysdale D. *An Introduction to Fire Dynamics*. Chichester: University of Edinburgh, 1999. 470 p.
8. Karlsson B., Quintiere J.G. *Enclosure Fire Dynamics*. Boca Raton: CRC Press, 2000. 316 p.
9. Carlsson E. *External fire spread to adjoining buildings – A review of fire safety design guidance and related research*. Lund: Department of Fire Safety Engineering Lund University, 1999. 125 p.
10. Law M. *Heat radiation from fires and building separation distance*. *Fire Research Technical Paper No. 5*. London: Her Majesty's Stationery Office, 1963. 45 p.
11. Pesic D., Zigar D., Raos M., Anghel I. Simulation of fire spread between residential buildings regarding safe separation distance. *Technical Gazette*, 2017. Vol. 24, No. 4. Pp. 1137–1145. DOI: 10.17559/TV-20150923233514.

12. Edalati-Nejad A., Ghodrat M., Fanaee S.A., Simeoni A. Numerical Simulation of the Effect of Fire Intensity on Wind Driven Surface Fire and Its Impact on an Idealized Building. *Fire*, 2022. Vol. 5, No. 1. Article 17. 18 p. DOI: 10.3390/fire5010017.
13. Pastukhov S.M., Teteryukov A.V. Metodika provedeniya eksperimental'nykh issledovaniy po opredeleniyu geometricheskikh parametrov plameni pri gorenii krovel'nykh materialov [The method of experimental researches to determine the geometric parameters of the flame during combustion of roofing materials]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 2. Pp. 176–185. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-2.176. EDN: XPAXID.
14. Pastukhov S.M., Platonov A.S., Teteryukov A.V., Drobysh A.S. Matematicheskaya model' opredeleniya uglovogo koeffitsiyenta obluchennosti pri raschete protivopozharnykh razryvov mezhdu zdaniyami s dvuskatnymi krovlyami, vypolnennymi iz goryuchikh materialov [Mathematical model for determining the configuration factor when calculating fire risks between buildings with double roofs made of combustible materials]. *Journal of Civil Protection*, 2021. Vol. 1, No. 1. Pp. 93–103. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.93. EDN: DBRUSN.
15. Pastukhov S.M., Platonov A.S., Teteryukov A.V., Drobysh A.S. Matematicheskaya model' opredeleniya uglovogo koeffitsiyenta obluchennosti dlya rascheta plotnosti teplovogo potoka ot izluchatelya ploskoy formy [Mathematical model for determining the angular irradiation coefficient for calculating the heat flux density coming from a plane-shaped emitter]. *Journal of Civil Protection*, 2025. Vol. 9, No. 1. Pp. 5–20. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.9-1.5. EDN: DIVTKW.
16. Snegirev A.Yu., Talalov V.A. *Teoreticheskie osnovy pozharo- i vzyvobezopasnosti* [Theoretical foundations of fire and explosion safety]. St. Petersburg Polytechnic University, 2007. 215 p. (rus)
17. Wilcox D.C. *Turbulence modeling for CFD*. La Canada, California: DCW Industries Inc, 1998. 537 p.
18. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994. Vol. 32, No. 8. Pp. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.
19. Hankalin V., Ahonen T., Raiko R. On thermal properties of a pyrolysing wood particle. *Proc. of Finnish-Swedish Flame Days 2009, January 28-29, 2009, Naantali, Finland*. 16 p.

Copyright © 2025 Pastukhov S.M., Chorny A.D., Teteryukov A.V.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.