

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА ПРИ ГОРЕНИИ СКАТНЫХ КРЫШ****Полевода И.И., Чорный А.Д., Тетерюков А.В.**

*Цель.* Разработать физико-математическую модель и определить закономерности теплового и газодинамического взаимодействия при горении скатных крыш, выполненных из горючих строительных материалов, с применением методов вычислительной гидродинамики. Рассмотреть процессы формирования конвективных и радиационных потоков для дальнейшего уточнения геометрических параметров излучающей поверхности и оценки теплового воздействия на соседние здания и сооружения.

*Методы.* Численное моделирование горения скатных крыш в программной среде ANSYS Fluent 2022 R2. Расчеты выполнены на основе решения осредненных уравнений Рейнольдса с применением модели SST  $k-\omega$  турбулентности, модели турбулентного горения с учетом модели диссипации вихря, метода дискретных ординат для радиационного теплообмена, модели пиролиза кровельных материалов и одношаговой модели сажеобразования. Граничные условия заданы на основе ранее проведенных экспериментальных исследований.

*Результаты.* Получены пространственно-временные распределения температурных полей, интенсивности тепловых потоков при горении скатных крыш. По результатам численного моделирования в программной среде Ansys Fluent установлено, что при горении крыши на расстоянии 1 м по горизонтали и 1 м по вертикали от фронтона и ската крыши значения температур лежат в интервале от 530 до 590 К, а плотность теплового потока составляет от 4,5 до 8,0 кВт/м<sup>2</sup>. Полученные данные согласуются с результатами экспериментальных исследований, подтверждая достоверность модели. Комплексно исследованы процессы пиролиза, турбулентного горения, лучистого теплообмена и сажеобразования при моделировании горения скатных крыш.

*Область применения исследований.* Определение величины противопожарных разрывов между зданиями с крышами, выполненными из горючих материалов. Полученные данные могут быть использованы при совершенствовании инженерных методик и нормативных правовых актов по пожарной безопасности, а также представляют практический интерес для проектных институтов, сотрудников МЧС и научно-образовательных учреждений.

*Ключевые слова:* противопожарный разрыв, горение крыш, численное моделирование, тепломассоперенос, плотность теплового потока, вычислительная гидродинамика.

(Поступила в редакцию 12 января 2026 г.)

**Введение**

Анализ пожаров, вызванных несоблюдением противопожарных разрывов [1], показал, что наибольшее количество пожаров происходит в зданиях класса Ф1.4 – многоквартирные, блокированные жилые дома и агроусадьбы. Данные здания и сооружения в основном возведены с применением горючих строительных материалов как в несущих и ограждающих конструкциях (стены, крыша), так и в элементах наружной отделки.

В существующих расчетных методиках по определению противопожарных разрывов между зданиями с крышами, выполненными из горючих материалов [2, с. 317–341; 3, с. 179–194; 4, с. 27–39; 5, с. 53–74; 6, с. 171–184; 7, с. 9–14], геометрические параметры крыши и, соответственно, излучающей поверхности при ее горении учитываются в упрощенном виде, что существенно влияет на точность оценки теплового воздействия на соседние здания и сооружения. При этом детальные исследования по определению геометрических параметров излучающей поверхности проводились для случаев горения различных объектов [8–11]. Исследования [8] направлены на разработку методики оценки противопожарных разрывов между автомобилями и обоснования безопасного размещения автомобилей на стоянках. В результате получены экспериментальные данные о пожарной опасности автомобиля и геометрических параметрах излучающей поверхности при воздействии на него теплового излучения от модельных очагов пожара, разработан проект рекомендаций по нормированию противопожарных разрывов между автомобилями [8].

В работе [9] разработана методика расчета температурного поля горизонтального резервуара с нефтепродуктом при воздействии на него тепловых потоков от модельных очагов

пожара. На основе экспериментальных данных разработана математическая модель и программное обеспечение по определению нестационарного температурного поля горизонтального резервуара с нефтепродуктом, позволяющее определять противопожарные разрывы и прогнозировать пожароопасные ситуации на нефтегазовых объектах [9].

Исследования [10] направлены на определение геометрических параметров пламени горящей пожарной нагрузки в виде островковой торговли в объеме многосветного помещения (атриума). Разработан алгоритм для определения ширины такого помещения, препятствующей распространению пожара из одной части здания в другую при нахождении в нем пожарной нагрузки [10].

В [11] определены пространственно-временные параметры противопожарных барьеров, включающих распределение лучистого теплового потока от протяженных фронтов пламени и воспламеняемость наземного горючего материала лесных насаждений. Полученная методика [11] позволяет определять величину противопожарного разрыва и время его защитного действия, обеспечивая надежную защиту лесного массива от низовых пожаров, в том числе в условиях аномально засушливой погоды. Можно отметить, что детальных исследований по определению геометрических параметров излучающей поверхности при горении крыш, выполненных из горючих материалов, не проводилось [12].

Одним из направлений исследований является проведение натуральных огневых испытаний для получения экспериментальных данных с целью модернизации существующих методик СН 2.02.05-2020<sup>1</sup>, СН 2.01.03-2019<sup>2</sup> и СТБ 11.05.03-2010<sup>3</sup> по оценке противопожарных разрывов между зданиями с крышами, выполненными из горючих материалов, в части определения геометрических параметров излучающей поверхности.

Одним из проблемных вопросов при расчете противопожарных разрывов между индивидуальными жилыми домами является определение углового коэффициента облученности от двускатной крыши, выполненной из горючих материалов. По методикам [2, с. 317–341; 3, с. 179–194; 6, с. 171–184; 7, с. 9–14] возможно определить данный параметр, принимая излучающую поверхность только в качестве прямоугольника, при этом ширина пламени принимается равной длине фасада, а высота – как геометрическая высота здания до конька крыши. Указанное допущение значительно увеличивает расчетную площадь излучающей поверхности. Для решения данного вопроса была разработана универсальная аналитическая модель расчета углового коэффициента облученности для многоугольных излучающих поверхностей, расположенных под произвольным углом к принимающей поверхности [13; 14].

Для уточнения форм и геометрических размеров излучающих поверхностей в работе [12] проведены натурные экспериментальные исследования. При горении экспериментального фрагмента двускатной крыши, выполненной из горючих материалов, посредством тепловизионной съемки установлено, что излучающая поверхность от фронтона двускатной крыши (размерами в плане 1,5×3 м) имеет форму треугольника, высота которого превышает значение высоты фронтона экспериментального фрагмента.

Целью настоящей работы является разработка физико-математической модели и расчет нестационарного конвективного и радиационного теплопереноса при горении крыши с последующей оценкой динамики распределения газодинамических и тепловых характеристик продуктов сгорания в пространстве, окружающем крышу, выполненную из горючих материалов.

## Основная часть

**Постановка задачи и методика исследования.** В практике обеспечения пожарной безопасности зданий применяются три основных метода определения противопожарных разрывов: табличный, аналитический (инженерный) [15] и методы численного моделирования (полевой метод моделирования пожаров) [16; 17]. Метод численного моделирования, как

<sup>1</sup> Пожарная безопасность зданий и сооружений: СН 2.02.05-2020. – Взамен СН 2.02.01-2019 (с отменой ТКП 45-2.02-315-2018 (33020)); введ. 04.04.2021. – Мн.: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2020. – IV, 70 с.

<sup>2</sup> Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Воздействия для определения огнестойкости: СН 2.01.03-2019. – Введ. 15.06.2020 (с отменой ТКП EN 1991-1-2-2009 (02250)). – Мн.: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2020. – IV, 43 с.

<sup>3</sup> Система стандартов пожарной безопасности. Пожарная безопасность технологических процессов. Методы оценки и анализа пожарной опасности. Общие требования: СТБ 11.05.03-2010. – Взамен СТБ П 11.05.03-2006; введ. 01.01.2011. – Мн.: Бел. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2010. – III, 76 с.

правило, применяется для сложных объектов или плотной застройки и предполагает использование программных комплексов (например, FDS, Ansys и др.), позволяющих моделировать развитие пожара и тепловое воздействие на соседние здания и сооружения. Примеры использования данного подхода изложены в работах [18; 19].

Как указано выше, для определения характера изменения температуры и тепловых потоков на различном расстоянии от крыши при ее горении требуется определение газодинамического и теплового состояния газовой среды при ее движении в пространстве, ограниченном расчетной областью. В рамках подходов вычислительной гидрогазодинамики для расчета использовалась модель тепломассопереноса при горении [1]. Алгоритм расчета горения крыши, выполненной из горючих материалов, строится на общем алгоритме, представленном на рисунке 1. Он включает модель реагирующего потока газовой смеси с использованием модели турбулентности [1; 17, с. 12–16; 20; 21, с. 28–31] и одношаговую эмпирическую модель сажеобразования [21, с. 40–41; 22]. Соответствующие уравнения могут быть представлены как:

– уравнение неразрывности

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

– уравнение движения

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right) + \rho g_i; \quad (2)$$

– уравнение кинетической энергии турбулентности  $k$

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

– уравнение удельной скорости диссипации  $\omega$

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

– уравнение энергии в терминах тепловой энтальпии  $h$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_j^R}{\partial x_j}; \quad (5)$$

– уравнение для концентрации компонентов газа  $Y_l$

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

– уравнение для концентрации сажи  $S$

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

где  $\rho$  – осредненная плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$t$  – время, с;

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

$u_i$  – компонента осредненной скорости ( $i = 1..3$ ), м/с;

$\mu$  и  $\mu_t$  – динамическая и турбулентная вязкость, Па·с;

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

$k$  – удельная кинетическая энергия турбулентности (КЭТ), м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;

$g_i$  – координаты вектора ускорения свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\omega$  – удельная скорость диссипации КЭТ (частота турбулентности), с<sup>-1</sup>;

$h$  – удельная энтальпия, Дж/кг. Выражается через концентрации компонентов газовой смеси  $Y_l$  и энтальпии каждого из компонентов  $h = \sum_{l=1}^N Y_l \left( h_l^0 + \int_{T_0}^T c_{p,l}(T) dT \right)$ ;

$Y_l$  – концентрации компонентов газа ( $l = 1..N$ ), кг/м<sup>3</sup>;

$h_l^0$  – энтальпия компонентов газа при температуре  $T_0$ , Дж/кг;

$T_0$  – температура окружающей среды, К;

$T$  – температура газа, К;

$c_{p,l}$  – изобарная теплоемкость компонентов смеси, Дж/(кг К);

$q_j^R$  – плотность теплового потока за счет лучистого теплопереноса, Вт/м<sup>2</sup>;

$Y_S$  – концентрация сажи;

$S_l$  и  $S_S$  – осредненные скорости химических реакций образования продуктов сгорания и сажи, кг/(м<sup>3</sup>·с);

$p$  – осредненное статическое давление, Па;

$Pr$ ,  $Sc$  и  $Pr_t$ ,  $Sc_t$  – молекулярные и турбулентные числа Прандтля и Шмидта соответственно. Молекулярная динамическая и турбулентная вязкости  $\mu$  и  $\mu_t$  (Па·с), генерация турбулентной энергии  $P_k$  (кг/(м·с<sup>3</sup>)), эмпирические константы  $\sigma_k$  и  $\sigma_\omega$ , и эмпирические безразмерные константы и функции смешения SST  $k$ - $\omega$  модели Ментера  $\beta^*$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\sigma_\omega$ ,  $F_1$  детально описаны в работе [1] согласно [20].

Система уравнений дополнена уравнением состояния газа, формула:

$$p = R\rho T \sum_{l=1}^N Y_l / M_l, \quad (8)$$

где  $R = 8,314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;

$M_l$  – молярная масса газовых компонентов, кг/моль.

Плотность теплового потока за счет лучистого теплопереноса  $q_j^R$  (Вт/м<sup>2</sup>) определяется с помощью модели излучения (модель дискретных ординат [23; 24, с. 243–249; 25]), которая используется с учетом влияния концентрации сажи на лучистый теплоперенос. Уравнение переноса интенсивности излучения  $I_n$  в направлении  $n$  [24, с. 231] записывается следующим образом:

$$\vec{s}_n \cdot \nabla I_n = \kappa_{\text{общ}} (I_b - I_n), \quad (9)$$

где  $\vec{s}_n$  – единичный вектор направления  $n$ ;

$I_n$  – интенсивность излучения, Вт/м<sup>2</sup>;

$\kappa_{\text{общ}} = \kappa_g + \kappa_s$  – суммарный коэффициент поглощения;

$\kappa_g$  – коэффициент поглощения газом, может рассчитываться по модели WSGGM (Weighted Sum of Gray Gases Model) [24, с. 223–227] или вычисляться по формуле [26]:

$$\kappa_g = 0,32 + 0,28 \exp(-T / 1135);$$

$\kappa_s = 3,83 f_v C_0 T / C_2$  – коэффициент поглощения сажей;

$C_0$  – эмпирическая константа (принятая равной 5,0);

$C_2 = 0,014388$  м·К – вторая постоянная Планка;

$f_v = \rho Y_s / \rho_s$  – доля сажи;

$\rho_s$  – плотность сажи (~2000 кг/м<sup>3</sup>) [26].

$I_b = \sigma T^4 / \pi$  – интенсивность излучения абсолютно черного тела, Вт/м<sup>2</sup>;

$\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>.

Тогда согласно [23; 24, с. 232], учитывая, что  $\vec{q}^R = \iint_{\Omega} I(\vec{s}) \vec{s} d\Omega \approx \sum_{n=1}^M I_n \vec{s}_n w_n$ , дивергенция теплового потока в уравнении для энтальпии определяется как [24, с. 249]:

$$\begin{aligned} \nabla \vec{q}^R &= \frac{\partial q_j^R}{\partial x_j} \stackrel{(9),(10)}{=} \iint_{\Omega} \kappa_{\text{общ}} (I_b - I_n) d\Omega = \kappa_{\text{общ}} \left( \int_0^{2\pi} \int_0^\pi I_b \sin \theta d\theta d\varphi - \iint_{\Omega} I_n d\Omega \right) = \\ &= \kappa_{\text{общ}} (4\pi I_b - G) = \kappa_{\text{общ}} (4\sigma T^4 - G), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $G = \sum_{n=1}^M I_n w_n$  – падающее излучение, просуммированное по всем направлениям.

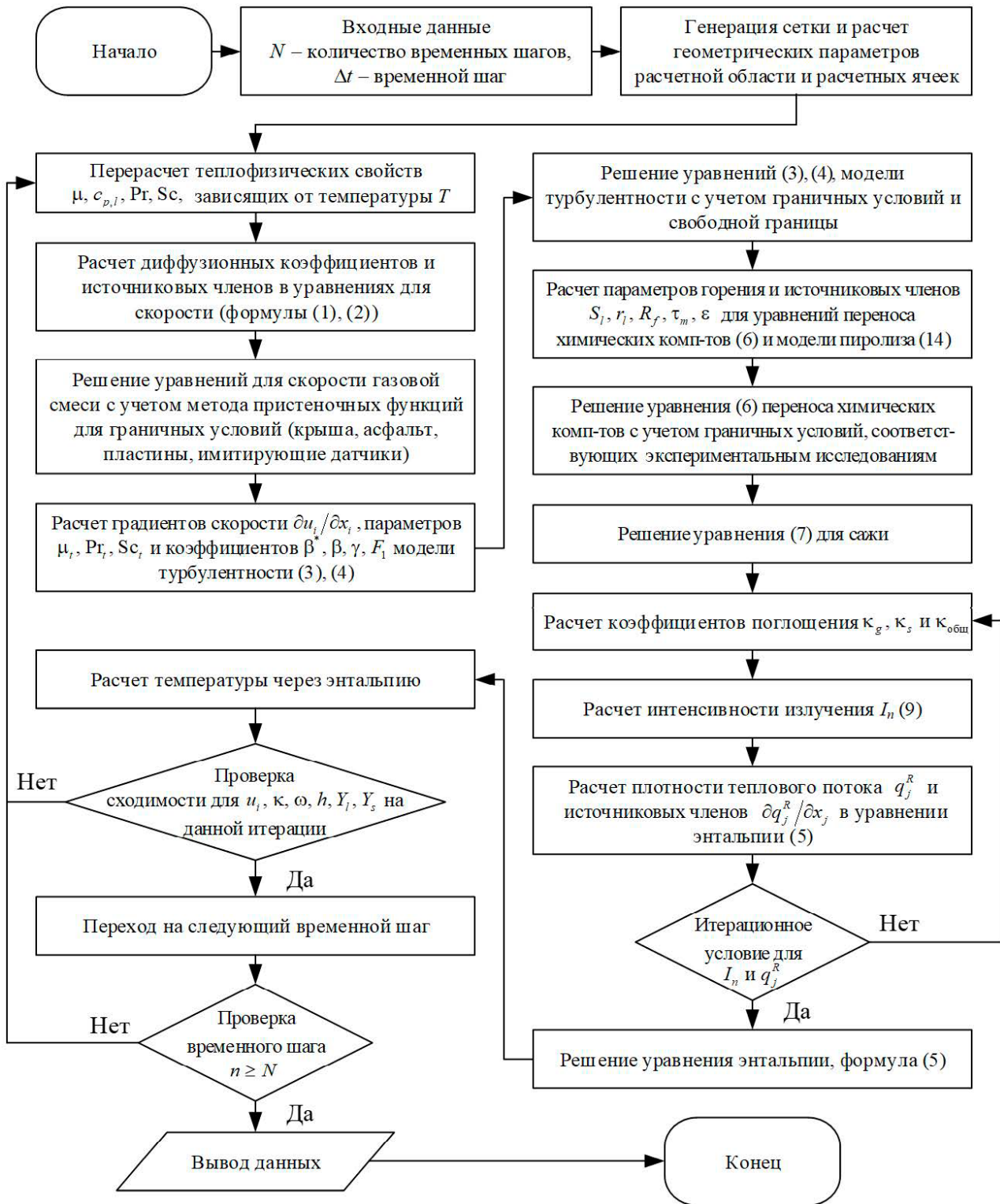


Рисунок 1. – Алгоритм расчета пожара на основе модели тепломассопереноса при горении горючих материалов с учетом пиролиза, лучистого теплообмена, сажеобразования, поглощения и рассеяния излучения образованной сажей

При предположении одностадийной бесконечно быстрой необратимой химической реакции между горючим компонентом и окислителем при турбулентном горении источниковые члены  $S_i$  (кг/(м<sup>3</sup> с)) учитываются через модель диссипации вихря EDM (Eddy Dissipation Model) [21; 22] как:

$$S_i = -r_i R_f, \quad (11)$$

где  $r_i$  – стехиометрический коэффициент компонентов газовой смеси;

$R_f$  – скорость выгорания горючего компонента, кг/(м<sup>3</sup>·с).

Скорость выгорания ограничивается процессом турбулентного перемешивания реагентов и определяется величиной, обратно пропорциональной временному масштабу смешения  $\tau_m = k/\varepsilon$  [21, с. 37; 22]:

$$R_f = \rho \frac{C_R}{\tau_m} \min(Y_1, Y_2 / r_2), \quad (12)$$

где  $\varepsilon = \beta^* \omega k$  – скорость диссипации КЭТ, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;

$C_R = 4$  – эмпирическая константа модели диссипации вихря;

$Y_1$  и  $Y_2$  – концентрации горючего компонента и окислителя соответственно;

$r_2$  – стехиометрическое отношение окислителя к топливу по массе.

В то же время в одношаговой модели сажеобразования [21, с. 40–41; 22; 27, с. 272–273] осредненная скорость химической реакции образования сажи  $S_S$  (кг/(м<sup>3</sup>·с)) определяется как:

$$S_S = R_S^+ + R_S^-, \quad (13)$$

где  $R_S^+ = C_S P_f \frac{r_2 Y_1}{Y_2} \exp(-E_S / (RT))$  – скорость образования сажи, кг/(м<sup>3</sup>·с);

$R_S^- = -\rho \frac{C_R}{\tau_m} Y_S \frac{Y_2}{r_S Y_S + Y_1}$  – скорость окисления сажи, кг/(м<sup>3</sup>·с);

$C_S$  – константа образования сажи [27, с. 273], с/м<sup>2</sup>;

$P_f$  – парциальное давление горючего компонента, Па;

$E_S$  – энергия активации сажи [27, с. 273], Дж/моль;

$r_S$  – стехиометрический коэффициент сажи.

Дополнительной отличительной особенностью алгоритма, приведенного на рисунке 1, от алгоритма, представленного в [1], является необходимость привлечения модели пиролиза материалов крыши для постановки граничных условий на ее поверхности [25; 28]. Для расчета пиролиза материалов крыши использовался подход, аналогичный представленному в работе [29]. Тепловой поток проводится через материал крыши, который выделяет летучие вещества. Предполагается, что все летучие вещества уходят с поверхности сразу после их образования.

Представленная выше система уравнений лежит в основе алгоритма, приведенного на рисунке 1, который включает последовательно расчет газодинамики с учетом турбулентности, химического реагирования (горение, пиролиз, сажеобразование) через итерационный процесс определения лучистого теплопереноса с влиянием сажи к расчету энтальпии и температурного распределения. Данный алгоритм использован при моделировании с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent 2022 R2, обладающего возможностью реализации пользовательских функций, что обеспечивает включение дополнительных подмоделей, выходящих за рамки встроенных моделей, представленных по умолчанию.

**Моделирование горения скатных крыш.** Для определения интенсивности теплового потока и распределения температурных полей в прилегающей к крыше области рассматриваются две зоны горения: зона горения (скатная крыша) как часть пространства, в котором происходит горение; зона теплового воздействия (окружающая среда вокруг крыши) – пространство, примыкающее к зоне горения, в котором происходят процессы теплопереноса за счет перемещения нагретых продуктов сгорания и воздуха окружающей среды.

Согласно указанным зонам горения формируется расчетная область, представленная на рисунке 2 и ограниченная сверху свободной границей (красный цвет), снизу (синий цвет) – поверхностью земли и установленной на ней крышей согласно требованиям методики экспериментальных исследований [12].

Поскольку экспериментальные исследования проводились при условии отсутствия рядом расположенных элементов застройки или других объектов, загромождающих окружающее пространство, размеры расчетной области выбирались из требований реализации условия нахождения крыши в полуограниченном пространстве. При ширине крыши 3 м и ее высоте 1,5 м горизонтальный размер расчетной области составил 43 м, а вертикальный – 31,5 м.

В таком случае фактически имитируются условия пожара открытого типа, когда от очага пожара из-за эффекта плавучести восходят конвективные потоки с образованием конвективных колонок, интенсивность которых зависит от температуры в зоне горения.

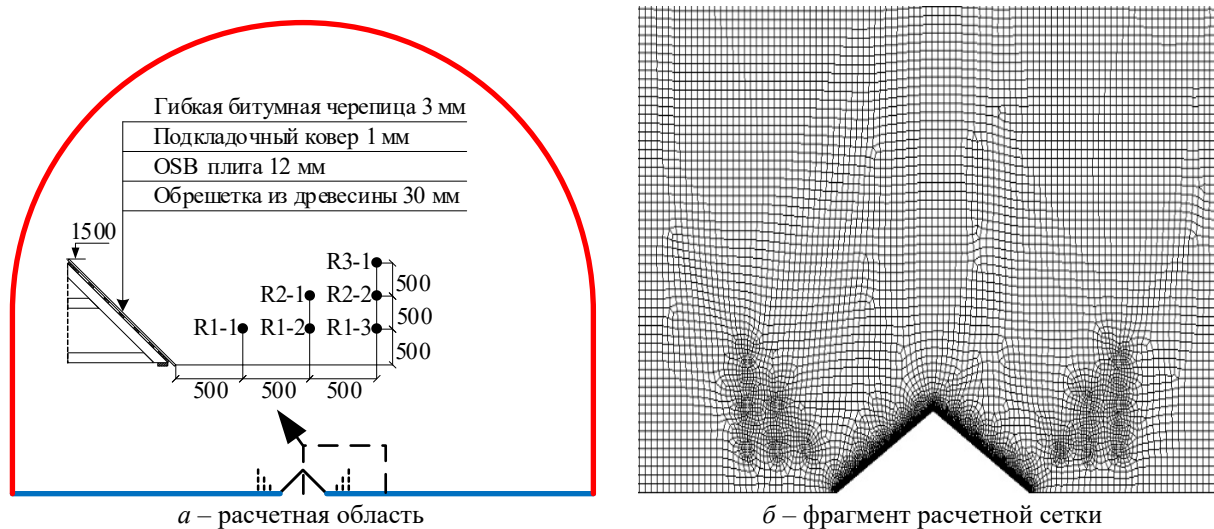


Рисунок 2. – Расчетные область и сетка, включающая крышу и окружающее ее пространство (вид спереди)

В отличие от внутреннего пожара, где поднимающиеся в конвективной колонке нагретые газы достигают горизонтальной ограждающей конструкции и растекаются по нему, образуя припотолочный слой продуктов горения высокой концентрации, в рассматриваемом случае предполагается возможность переноса продуктов сгорания за пределы свободной границы. Таким образом, принятые размеры расчетной области (рис. 2) обусловлены необходимостью имитации свободного пространства вокруг рассматриваемого объекта и для моделирования развития пожара, а также распространения продуктов сгорания, конвективного теплопереноса с минимальным влиянием ограниченности расчетной области и условий на границе. Граничные условия задавались согласно рекомендациям [16, с. 57–59; 17, с. 24–30; 21, с. 31–35, 85–89]. На ограничивающей сверху границе (красная линия на рисунке 2а) предполагалось, что избыточное давление отсутствует (справедливо при достаточно удаленной свободной границе расчетной области). Для скоростных и концентрационных характеристик ставятся граничные условия открытого типа, что позволяет задать условия возможности появления возвратного течения. На данных участках устанавливаются условия подкачки внутрь расчетной области воздуха с температурой, равной температуре окружающей среды в начальный момент времени (или далеко от очага пожара). Такое условие, кроме всего, обеспечивает подачу окислителя (воздуха) в расчетную область, устранение его полного выгорания, как это происходит при рассмотрении горения в замкнутых пространствах.

Вследствие условий безветренной погоды при проведении экспериментальных исследований [12] теплоперенос будет осуществляться при условиях, близких к естественной конвекции. В связи с этим для регистрации интенсивности тепловых потоков (конвективных, лучистых) на различном расстоянии от крыши внутри расчетной области устанавливались поверхности, имитирующие датчики, которые использовались в экспериментальных исследованиях для регистрации температуры и теплового потока [12]. На рисунке 2а приведено расположение данных поверхностей согласно эксперименту [12].

Таким образом, рассматривается нестационарная задача теплопереноса от источника теплоемассовыделения в окружающую среду (воздух). В качестве очага пожара выступает поверхность крыши.

Площадь очага пожара  $S_f$  (м<sup>2</sup>) ограничена поверхностью крыши при открытом пожаре. Тогда через определенный промежуток времени величина расхода газообразных продуктов сгорания  $U$  (кг/с), поступающих в конвективную колонку, может стабилизироваться во времени. Расход газа  $U$  зависит от конвективной составляющей мощности очага пожара  $Q_c$  (МВт) [30, с. 211], определяемой из формулы:

$$q_c = Q_c / S_f = (1 - \phi)\eta Q_p \psi_{уд}, \quad (14)$$

где  $q_c$  – удельная конвективная мощность очага пожара, МВт/м<sup>2</sup>;

$\varphi$  – доля теплоты, отдаваемой очагом пожара ограждающим конструкциям. При рассмотрении пожара открытого типа (горение поверхности крыши) параметр  $\varphi$  обычно принимается нулем [30, с. 211];

$\eta$  – коэффициент полноты сгорания ( $\eta = 0,85 - 0,9$ );

$Q_p$  – теплота сгорания горючих материалов, МДж/кг;

$\Psi_{уд}$  – удельная скорость выгорания, кг/(с·м<sup>2</sup>).

Моделирование производится с использованием метода конечных объемов [16, с. 59–60; 17, с. 6–7; 28]. В связи с этим расчетная область разбивалась на множество объемных сеточных ячеек конечного размера, совокупность которых представляет собой расчетную сетку с обеспечением лучшей сходимости численного метода с меньшими невязками (с лучшей точностью решения) и удовлетворения параметров сетки (скошенность ячеек, ортогональность, комфортность сетки), соответствующих лучшему ее качеству. На рисунке 2б демонстрируется разбиение расчетной области на конечные элементы (количество ячеек 129 500 шт.).

Следует отметить, что построение сетки осуществлялось по следующей процедуре. Около стенок, где наиболее интенсивно происходят процессы химического реагирования, тепловыделения, конвективного и радиационного переноса, размеры ячеек выбирались минимальными (с линейным размером 1 см) из расчета пяти ячеек в пограничном с поверхностью крыши слое окружающей газовой среды. Далее от этих ячеек строились остальные ячейки с их раздацией в свободное пространство с коэффициентом увеличения 1,2.

Для нахождения тепловых потоков и распределения температуры в точках, отстоящих от натурального фрагмента на расстояниях 0,5*i* м по горизонтали и 0,5*j* м по вертикали,  $i = 1..3, j = 1..i$ , от горящей крыши, моделирование производилось исходя из предположения о развитии пожара согласно нескольким стадиям [12]. Первоначально возгорание осуществляется внутри подкровельного пространства, далее происходит выгорание фронтона и прорыв пламени наружу, тогда как на поверхности крыши не наблюдается горения, а осуществляется ее нагрев. При этом, как показывают экспериментальные исследования [12], температура окружающей крышу среды остается практически неизменной относительно начальных значений. Повышение температуры на различном расстоянии от экспериментального фрагмента начинает происходить существенно после прорыва пламени на поверхность крыши и распространения пламени по всей поверхности (согласно экспериментальным исследованиям выход пламени на поверхность крыши происходил в интервале с 38-й по 42-ю мин). Таким образом, за начальную точку моделирования выбиралось именно время начала горения внешней поверхности крыши. В этом случае предполагается, что вся внешняя поверхность крыши охвачена пожаром, когда в зависимости от удельной скорости выгорания материалов крыши может быть определен расход образующейся смеси продуктов сгорания, которая перемещается от поверхности крыши в открытое пространство. С этой целью рассматривались свойства горючих материалов (табл. 1), из которых изготовлена крыша.

Принимая, что для материалов крыши известны удельная скорость выгорания  $\Psi_{уд}$ , нижняя теплота сгорания  $Q_p$ , полнота сгорания  $\eta$ , можно оценить расход образующейся смеси продуктов сгорания и тепловыделение при горении конкретных материалов крыши.

При расчете предполагалось, что при достижении температуры объема горючего материала 473 К (температура появления летучих веществ при окислении древесины) на внешней поверхности крыши начинает проходить химическая реакция с выделением тепла. Это начальная точка расчета. В объемах материалов крыши задается объемное тепловыделение, а температура рассчитывается во времени, исходя из локальных нестационарных условий в окружающей среде.

Для постановки граничных условий по тепловыделению основным параметром для расчета является удельная конвективная мощность очага пожара  $q_c$  (МВт/м<sup>2</sup>) (15). Площадь излучающей поверхности для моделирования была принята как площадь поверхности скатов крыши  $S_f = 16,97$  м<sup>2</sup>, объем рулонных и плитных материалов определялся согласно толщине каждого слоя кровельного пирога, для стропильной системы и обрешетки, выполненных из древесины хвойных пород, рассчитывался из геометрической модели  $V_{др} = 0,795$  м<sup>3</sup>, описанной в работе [18]. Объемное тепловыделение  $Q_v$  (МВт/м<sup>3</sup>) используемых материалов рассчитывалось по формуле:

$$Q_v = q_c \cdot S_f / V_i, \quad (15)$$

где  $V_i$  – объем *i*-го материала кровельного пирога, м<sup>3</sup>.

Расход газообразных летучих компонентов, образующихся на рассматриваемых поверхностях, можно оценить из удельной скорости выгорания как:

$$U = \eta \psi_{\text{уд}} \cdot S_f. \quad (16)$$

Объемное тепловыделение  $Q_v$  и расход летучих компонентов  $U$ , необходимы для постановки граничных условий на поверхности крыши, покрытой битумной черепицей с подкладочным ковром. Расчетные параметры для моделирования пожара скатной крыши представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Свойства горючих материалов крыши

№ п/п	Материал	Теплота сгорания горючих материалов $Q_p$ , МДж/кг	Удельная скорость выгорания $\psi_{\text{уд}}$ , кг/(с·м <sup>2</sup> )	Коэффициент полноты сгорания	Плотность материала, кг/м <sup>3</sup>	Площадь поверхности материала, м <sup>2</sup>	Объем материала, м <sup>3</sup>	Объемное тепловыделение $Q_v$ , МВт/м <sup>3</sup>	Расход газообразных продуктов сгорания $U$ , кг/с
1	Гибкая битумная черепица	25,0	0,024	0,85	2800,0	16,97	0,051	251,6	0,346
2	Подкладочный ковер								
3	Плита OSB	18,0	0,013	0,97	572,8		0,255	15,1	0,214
4	Древесина хвойных пород (ель)	13,8			700,0		0,795	3,7	

При моделировании предполагалось, что основными химическими реакциями являлись объемная реакция летучих компонентов древесины и кислорода, а также объемная реакция летучих компонентов битумной черепицы (вместе с подкладочным ковром) и кислорода, параметры которых взяты из внутренней базы данных Ansys Fluent. Это относится и к выбору теплофизических свойств (теплоемкость, коэффициент теплопроводности, динамический коэффициент вязкости) в зависимости от температуры для летучих компонентов битумной черепицы с подкладочным ковром и древесины.

Условием прохождения химических реакций является момент превышения локальной температуры в произвольной точке расчетной области значения 473 К. Для области крыши (битумная черепица и материалы конструкции, выполненные из древесины) это означает, что на их поверхности появляется расход  $U$  летучих компонентов в количестве, определенном выше. Если при расчете реализуется меньшая температура, то в данной точке химической реакции не происходит.

При определении параметров модели лучистого теплообмена для поверхности датчиков устанавливалось значение степени черноты, соответствующее материалу датчиков [12]. Земляной покров представлял собой асфальтированную поверхность со степенью черноты 0,93, так же как и для мягкой битумной черепицы.

Модель образования сажи имплементирована в стандартном виде одношаговой реакции. Установленные по умолчанию в Ansys Fluent константы модели справедливы для широкого круга горючих материалов (источников сажи), таких как древесина и битумная черепица.

В результате расчетов были получены распределения скорости движения газовой смеси, температуры и плотности теплового потока в пространстве около горящей крыши в различные моменты времени после охвата пожаром всей поверхности крыши – 35-я мин расчета (рис. 3–5). Для демонстрации развития пожара на рисунках также представлены результаты моделирования на 45, 50 и 55-й мин.

Как демонстрируют рисунки 3–5, динамика развития переноса продуктов горения происходит через формирование конвективной струи около очага пожара с достижением скорости 10 м/с. Далее происходит распад следового течения и расширение области, в которой присутствуют продукты сгорания. Максимальная температура реализуется около очага пожара, где происходит интенсивное тепловыделение и химическое реагирование летучих компонентов с кислородом.

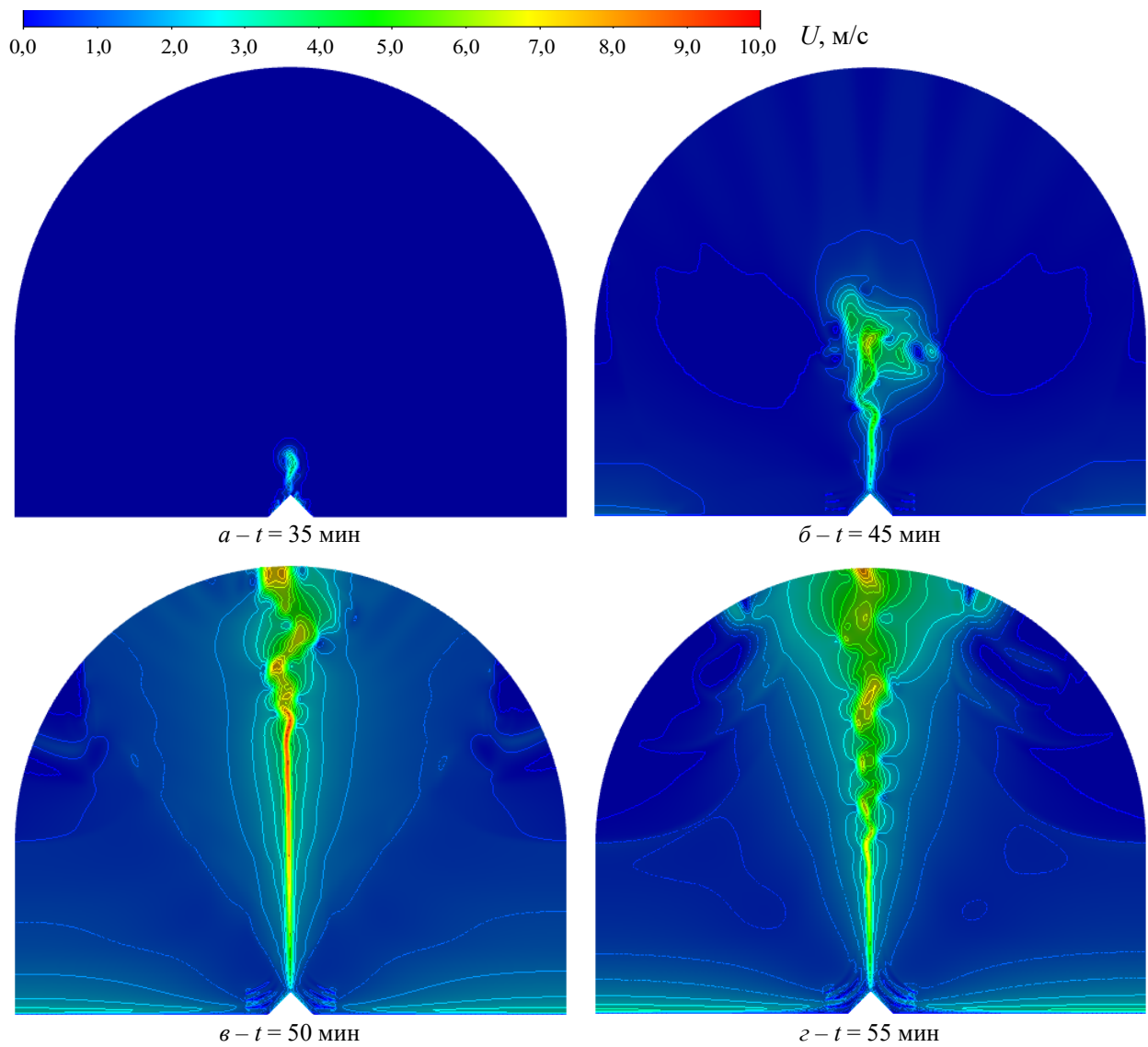


Рисунок 3. – Распределение скорости движения газовой среды в различные моменты времени после охвата пожаром поверхности крыши

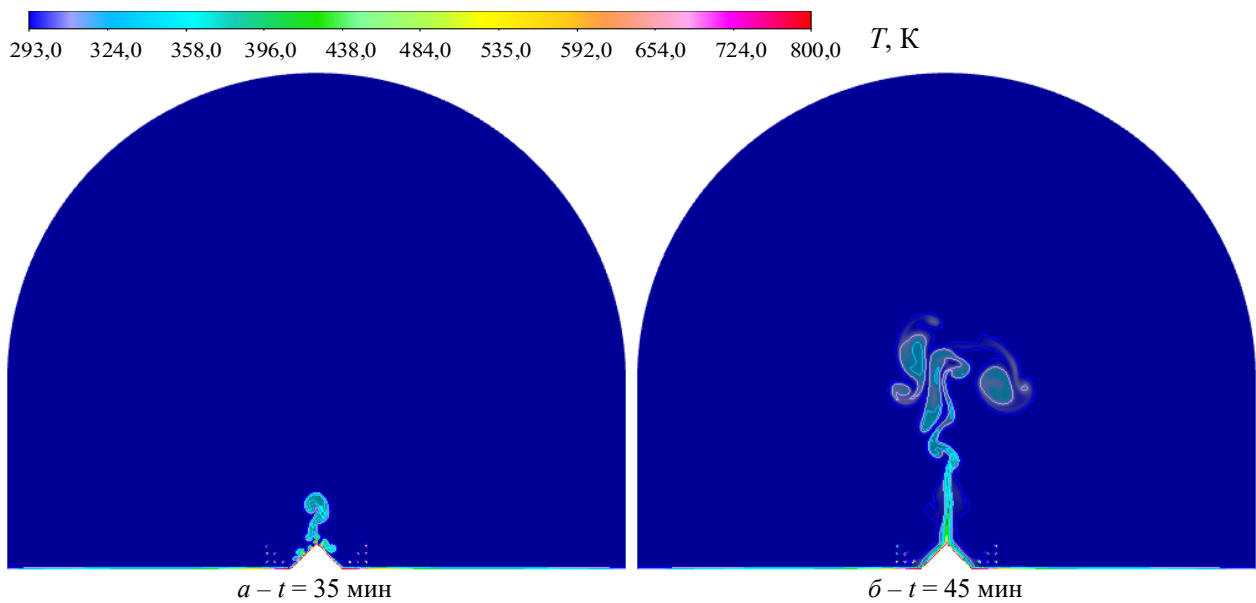
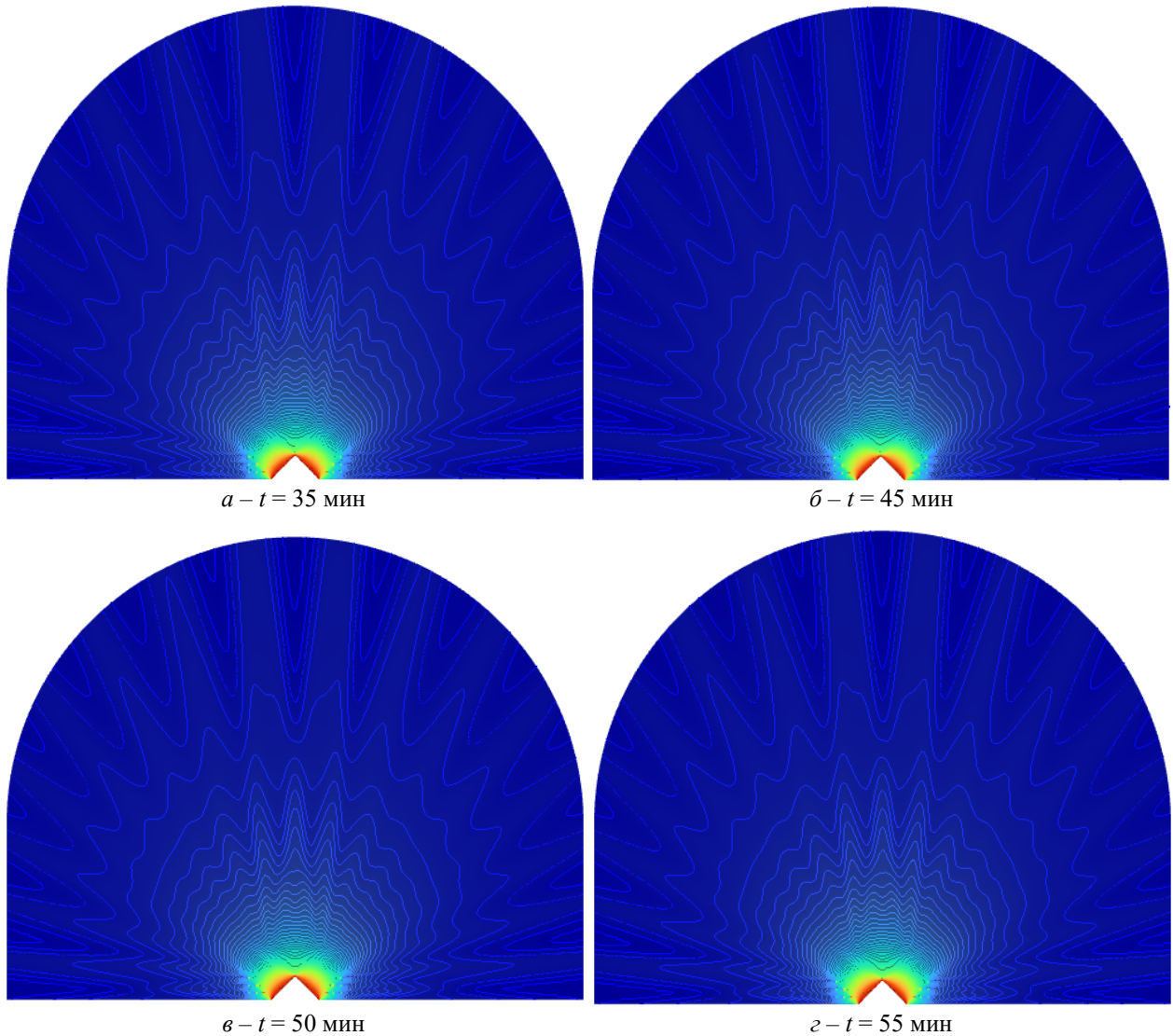
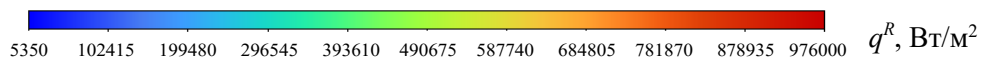
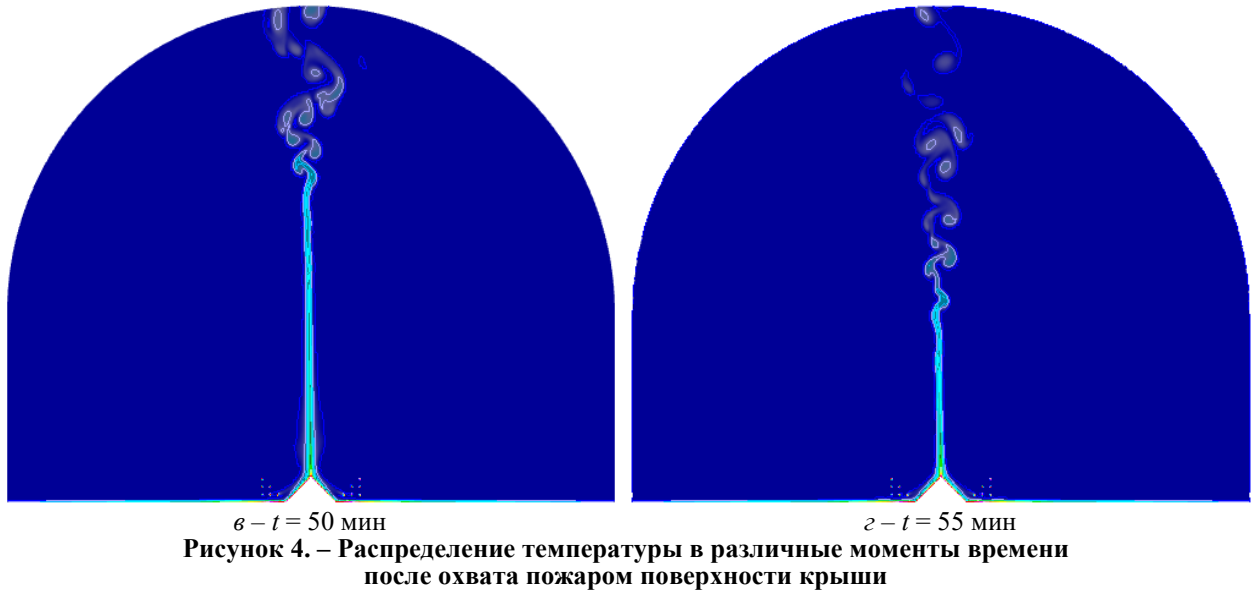


Рисунок 4. – Распределение температуры в различные моменты времени после охвата пожаром поверхности крыши



**Рисунок 5. – Распределение плотности лучистого теплового потока в различные моменты времени после охвата пожаром поверхности крыши**

Изменение плотности теплового потока на датчиках в диапазоне времени после формирования конвективного следа (рис. 6) демонстрирует изменение потока в зависимости от динамической структуры течения газовой среды около них. Можно отметить, что в среднем интенсивность лучистого теплового потока, падающего на датчики, составляет  $6,0 \text{ кВт/м}^2$ , что согласуется с результатами экспериментальных исследований [1]. При этом плотность теплового потока в зависимости от расположения датчиков изменяется в диапазоне от  $4,5$  до  $8,0 \text{ кВт/м}^2$ . Следует отметить, что в отличие от численного моделирования в ходе экспериментальных исследований имеет место обрушение элементов конструкции (53–57 мин). Данное обстоятельство приводит к изменению геометрии очага пожара и увеличению площади излучающих поверхностей. В результате в интервале времени с 54-й по 56-ю мин наблюдается рост плотности теплового потока, регистрируемого датчиками.

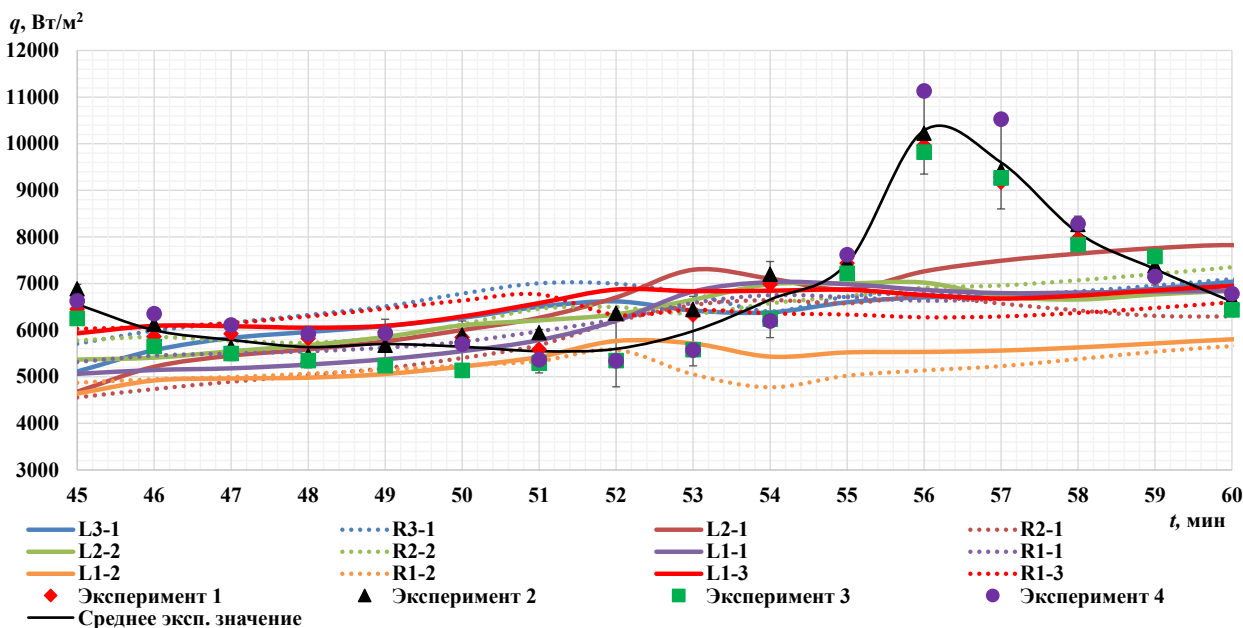


Рисунок 6. – Изменение плотности лучистого теплового потока на датчиках во времени

Расположение датчиков (пластин) и их подпись соответствуют расположению, приведенному на рисунке 2а. Датчики, которые располагались справа от фрагмента двускатной крыши, маркировались с буквой «R», соответственно с левой стороны – «L», зеркально. На рисунке 7 приведено изменение температуры поверхности датчиков в том же интервале времени.

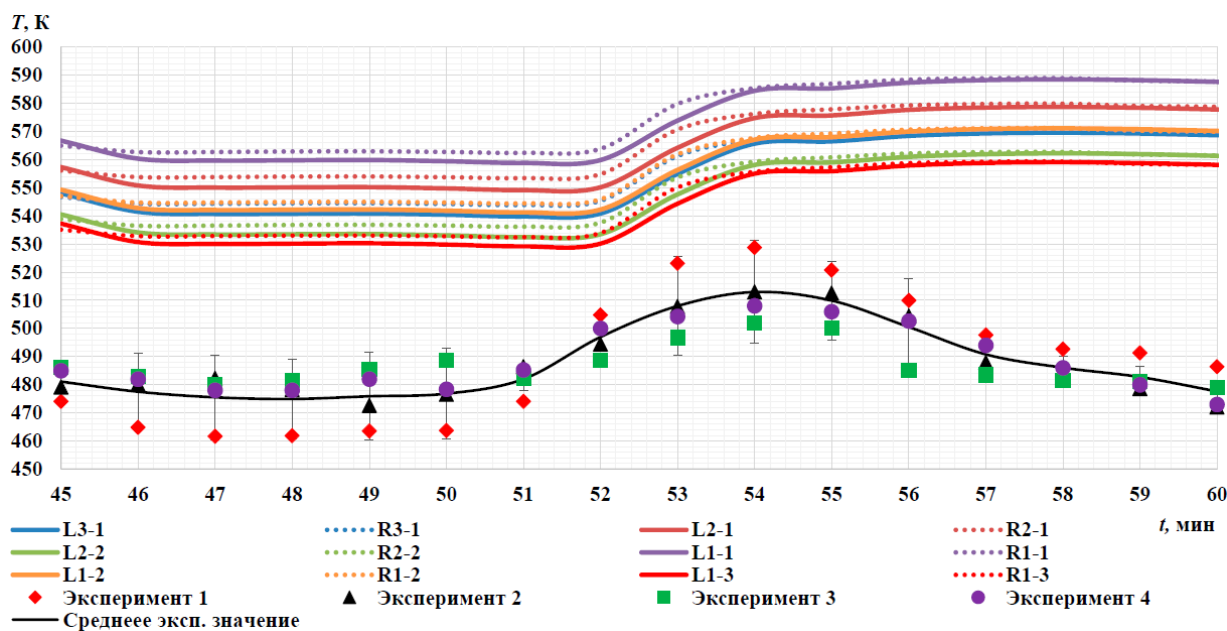


Рисунок 7. – Изменение температуры поверхности датчиков во времени

Как видно, изменение температуры также зависит от места расположения датчика. Диапазон изменения температуры лежит в интервале от 530 до 590 К. Расчетные зависимости, полученные в результате численного моделирования, демонстрируют более высокие значения температуры по сравнению с экспериментальными данными. Максимальное расчетное значение температуры поверхности датчиков составляет порядка 575 К, тогда как максимальное экспериментально зафиксированное значение не превышает 530 К. При этом расхождение между расчетными и экспериментальными значениями температуры в относительном выражении составляет 8,5 %, что свидетельствует о достаточном согласовании результатов. Отмеченная разница может быть обусловлена упрощениями, принятыми при численном моделировании, а также отличиями реальных условий теплообмена в эксперименте.

### Заключение

Разработана физико-математическая модель нестационарного теплопереноса при горении скатных крыш, выполненных из горючих строительных материалов, основанная на решении уравнений газодинамики, турбулентного горения, пиролиза материалов, сажеобразования и лучистого теплообмена с использованием метода дискретных ординат. Модель реализована в программной среде ANSYS Fluent и учитывает как конвективную, так и радиационную составляющие теплового воздействия очага пожара на окружающее пространство.

При использовании данной модели получены пространственно-временные распределения скорости движения газовой среды, плотности лучистого теплового потока и температуры. Установлено, что в точках на расстоянии 1 м по горизонтали и 1 м по вертикали от поверхности крыши значения плотности теплового потока лежат в диапазоне от 4,5 до 8,0 кВт/м<sup>2</sup>, а температуры на поверхности датчиков от 530 до 590 К. Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных по плотности теплового потока и температурам поверхности датчиков, показавшее достаточное согласование результатов. Относительное расхождение между расчетным и максимальным экспериментальными значениями температуры не превышает 8,5 %, что подтверждает достоверность разработанной модели и корректность принятых граничных условий.

Полученные результаты могут быть использованы для уточнения геометрических параметров излучающей поверхности при горении скатных крыш, а также для модернизации инженерных методик расчета противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями с крышами, выполненными из горючих материалов.

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. Инженерная методика определения противопожарных разрывов между зданиями с двускатными крышами, выполненными из горючих материалов / С.М. Пастухов, А.Д. Чорный, А.В. Тетерюков // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2025. – Т. 9, № 2. – С. 139–154. – DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-2.139. – EDN: ATFSVQ.
2. Ройтман, М.Я. Противопожарное нормирование в строительстве / М.Я. Ройтман. – М.: Стройиздат, 1985. – 590 с.
3. Пожарная профилактика в строительстве: учебник / Б.В. Грушевский [и др.]; под ред. В.Ф. Кудаленкина. – М., 1985. – 454 с.
4. Chitty, R. External fire spread: building separation and boundary distances: Report BR 187 / R. Chitty. – 2nd ed. – Garston, Watford: Building Research Establishment, 2014. – 68 p. – ISBN 9781848063198.
5. Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics / D. Drysdale. – Chichester: University of Edinburgh, 1999. – 470 p.
6. Karlsson, B. Enclosure Fire Dynamics / B. Karlsson, J.G. Quintiere. – Boca Raton: CRC Press, 2000. – 316 p.
7. 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.

8. Зайцев, В.В. Противопожарные расстояния между автотранспортными средствами на открытых пространствах: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Зайцев Владимир Викторович; Акад. гос. противопожар. службы МЧС России. – М., 2006. – 122 л.
9. Хабибулин, Р.Ш. Устойчивость к воздействию тепловых потоков пожара горизонтальных резервуаров с нефтепродуктом: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Хабибулин Ренат Шамильевич; Акад. гос. противопожар. службы МЧС России. – М., 2010. – 162 л.
10. Мироненко, Р.В. Ограничение распространения пожара через многосветные помещения по зданиям торгово-развлекательных центров: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Мироненко Роман Владимирович; Акад. гос. противопожар. службы МЧС России. – М., 2017. – 145 л.
11. Гоман, П.Н. Воспламеняемость наземного горючего материала хвойных насаждений при воздействии теплового излучения лесного пожара: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.02 / Гоман Павел Николаевич; Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь. – Мн., 2013. – 163 л.
12. 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: XPAХID.
13. 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. 5, № 1. – С. 93–103. – DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.93. – EDN: DBRUSN.
14. Пастухов, С.М. Математическая модель определения углового коэффициента облученности для расчета плотности теплового потока, приходящего 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.
15. 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.
16. Field modeling approach // Computational fluid dynamics in fire engineering: Theory, modelling and practice / edited by: Guan Heng Yeoh, Kwok Kit Yuen. – Butterworth-Heinemann, 2009. – Chapter 2. – P. 29–133. – DOI: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.00002-8.
17. Рыжов, А.М. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях: методические рекомендации / А.М. Рыжов, И.Р. Хасанов, А.В. Карпов [и др.]. – М.: ВНИИПО, 2003. – 35 с.
18. Cameron A., Asimakopoulou E. Radiative heat transfer methodologies from compartment fires to adjacent walls: A numerical investigation / A. Cameron, E. Asimakopoulou // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2885. – Article 012027. – 6 p. – DOI: 10.1088/1742-6596/2885/1/012027.
19. Pesic, D. Anghel I. 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.
20. Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications / F.R. Menter // American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal (AIAA Journal). – 1994. – Vol. 32, No. 8. – Pp. 1598–1605. – DOI: 10.2514/3.12149.
21. Снегирев, А.Ю. Моделирование теплообмена и горения при пожаре: дис. ... докт. техн. наук: 01.04.14 / Снегирев Александр Юрьевич; Академия гражданской авиации. – СПб., 2004. – 271 л.
22. Magnussen, B.F. Effects of turbulent structure and local concentrations on soot formation and combustion in C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> diffusion flames / B.F. Magnussen, B.H. Hjertager, J.G. Olsen, D. Bhaduri // Symposium (International) on Combustion. – 1979. – Vol. 17, No. 1. – P. 1383–1393. – DOI: 10.1016/S0082-0784(79)80130-7.
23. Fiveland, W.A. Discrete-ordinates solutions of the radiative transport equation for rectangular enclosures / W.A. Fiveland // ASME Journal of Heat and Mass Transfer. – 1984. – Vol. 106, No. 4. – P. 699–706. – DOI: 10.1115/1.3246741.
24. Additional considerations in field modeling // Computational fluid dynamics in fire engineering: Theory, modelling and practice / edited by: Guan Heng Yeoh, Kwok Kit Yuen. – Butterworth-Heinemann, 2009. – Chapter 3. – P. 135–266. – DOI: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.00003-X.

25. Parsa, V. Computational fluid dynamics of compartment fires: A review of methods and applications / V. Parsa, A. Santiago, L. Laím // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15, No. 5. – Article 2342. – DOI: 10.3390/app15052342.
26. Fletcher, D.F. Numerical simulation of smoke movement from a pool fire in a ventilated tunnel / D.F. Fletcher, J.H. Kent, V.B. Apte, A.R. Green // *Fire Safety Journal*. – 1994. – Vol. 23, No. 3. – P. 305–325. – DOI: 10.1016/0379-7112(94)90033-7.
27. Further considerations in field modeling // *Computational fluid dynamics in fire engineering: Theory, modelling and practice* / edited by: Guan Heng Yeoh, Kwok Kit Yuen. – Butterworth-Heinemann, 2009. – Chapter 4. – P. 267–365. – DOI: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.00004-1.
28. Di Blasi, C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis / C. Di Blasi // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2008. – Vol. 34, No. 1. – P. 47–90. – DOI: 10.1016/j.pecs.2006.12.001.
29. Kung, H.C. A mathematical model of wood pyrolysis / H.C. Kung // *Combustion and Flame*. – 1972. – Vol. 18, No. 2. – P. 185–195. – DOI: 10.1016/S0010-2180(72)80134-2.
30. Пожарная безопасность в строительстве: учебник в 2 ч. / В.М. Есин, С.П. Калмыков, М.В. Панов [и др.]. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. – Ч. 1. Пожарная безопасность систем отопления и вентиляции. – 275 с.

**Моделирование пожара при горении скатных крыш**  
**Fire modeling of pitched roof combustion**

***Полевода Иван Иванович***

доктор технических наук, профессор  
Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь»,  
начальник университета

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь

Email: ip@ucp.by

SPIN-код: 1662-9457

***Ivan I. Palevoda***

Grand PhD in Technical Sciences, Professor  
State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Head of University

Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus

Email: ip@ucp.by

ORCID: 0000-0003-2469-3553

***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

**FIRE MODELING OF PITCHED ROOF COMBUSTION****Palevoda I.I., Chorny A.D., Teteryukov A.V.**

*Purpose.* To develop a physico-mathematical model and to determine the regularities of thermal and gas-dynamic interaction during the combustion of pitched roofs made of combustible building materials using computational fluid and gas dynamics methods. The processes of convective and radiative heat flux formation are to be considered in order to further refine the geometric parameters of the radiating surface and to assess the thermal impact on adjacent buildings and structures.

*Methods.* Numerical simulation of pitched roof combustion in *ANSYS Fluent 2022 R2*. The calculations were made using the SST  $k-\omega$  turbulence model, a turbulent combustion model incorporating the eddy dissipation model, the discrete ordinates method for radiative heat transfer, a pyrolysis model for roofing materials, and a single-step soot formation model. Boundary conditions were specified based on previously conducted experimental studies.

*Findings.* Spatial-temporal distributions of temperature fields and heat flux intensities during pitched roof combustion were obtained. Based on the results of numerical simulations performed in the *ANSYS Fluent* software environment, it was established that during roof combustion, at a distance of 1 m horizontally and 1 m vertically from the gable and the roof slope, the temperature values range from 530 to 590 K, while the heat flux density varies from 4.5 to 8.0 kW/m<sup>2</sup>. The obtained data are in good agreement with the results of experimental studies, confirming the validity of the model. The processes of pyrolysis, turbulent combustion, radiative heat transfer, and soot formation in the modeling of pitched roof combustion were comprehensively investigated.

*Application field of research.* Determination of fire separation distances between buildings with roofs made of combustible materials. The obtained data can be used to improve engineering methodologies and fire safety regulatory documents and are also of practical interest to engineering organizations, design institutes, personnel of the MES, research and educational institutions.

*Keywords:* fire separation distance, roof combustion, numerical modeling, heat and mass transfer, heat flux density, computational fluid and gas dynamics.

(The date of submitting: January 12, 2026)

**REFERENCES**

1. Pastukhov S.M., Chorny A.D., Teteryukov A.V. Inzhenernaya metodika opredeleniya protivopozharnykh razryvov mezhdu zdaniyami s dvuskatnymi kryshami vypolnennymi iz goryuchikh materialov [Engineering method for determining fire safety spacing between buildings with gable roofs made of combustible materials]. *Journal of Civil Protection*, 2025. Vol. 9, No. 2. Pp. 139–154. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-2.139. EDN: ATFSVQ.
2. Roytman M.Ya. *Protivopozharnoe normirovanie v stroitel'stve* [Fire safety regulation in construction]. Moscow: Stroyizdat, 1985. 590 p. (rus).
3. 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: Glavmosstroy, 1985. 454 p. (rus)
4. Chitty R. *External fire spread: building separation and boundary distances*: Report BR 187. 2nd ed. Garston, Watford: Building Research Establishment, 2014. 68 p. ISBN 9781848063198.
5. Drysdale D. *An introduction to fire dynamics*. Chichester: University of Edinburgh, 1999. 470 p. ISBN 0471972908.
6. Karlsson B., Quintiere J.G. *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton: CRC Press, 2000. 316 p. ISBN 0849313007.
7. 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.
8. Zaytsev V.V. *Protivopozharnye rasstoyaniya mezhdu avtotransportnymi sredstvami na otkrytykh prostanstvakh* [Fire safety distances between vehicles in open spaces]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. State Fire Academy of EMERCOM of Russia. Moscow, 2006. 122 p. (rus)
9. Khabibulin R.Sh. *Ustoichivost' k vozdeistviyu teplovykh potokov pozhara gorizontallykh rezervuarov s nefteproduktom* [Resistance to fire heat flux impact of horizontal reservoirs with petroleum products]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. State Fire Academy of EMERCOM of Russia. Moscow, 2010. 162 p. (rus).
10. Mironenko R.V. *Ogranichenie rasprostraneniya pozhara cherez mnogosvetnye pomeshcheniya po zdaniyam trgovno-razvlekatel'nykh tsentrov* [Limiting fire spread through multi-light spaces in shopping

- and entertainment center buildings]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. State Fire Academy of EMERCOM of Russia. Moscow, 2017. 145 p. (rus)
11. Goman P.N. *Vosplamyaemost' nazemnogo goryuchego materiala khvoinykh nasazhdeniy pri vozdeystvii teplovogo izlucheniya lesnogo pozhara* [Inflammability of ground combustible material in coniferous plantations under the influence of thermal radiation from a forest fire]: PhD tech. sci. diss.: 05.26.03. Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus. Minsk, 2013. 163 p. (rus).
  12. 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.
  13. Pastukhov S.M., Platonov A.S., Teteryukov A.V., Drobysh A.S. Matematicheskaya model' opredeleniya uglovogo koeffitsienta obluchennosti pri raschete protivopozharnykh razryvov mezhdu zdaniyami s dvuskatnymi kryshami 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. 5, No. 1. Pp. 93–103. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.93. EDN: DBRUSN.
  14. Pastukhov S.M., Platonov A.S., Teteryukov A.V., Drobysh A.S. Matematicheskaya model' opredeleniya uglovogo koeffitsienta obluchennosti dlya rascheta plotnosti teplovogo potoka, prikhodyashchego 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.
  15. Pastukhov S.M., Zhamoydik S.M., Teteryukov A.V. Analiz podkhodov po otsenke minimal'no dopustimykh 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.
  16. Field modeling approach. *Computational fluid dynamics in fire engineering: Theory, modelling and practice*. Edited by: Guan Heng Yeoh, Kwok Kit Yuen. Butterworth-Heinemann, 2009. Chapter 2. Pp. 29–133. DOI: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.00002-8.
  17. Ryzhov A.M., Khasanov I.R., Karpov A.V., Volkov A.V., Litskevich V.V., Dekterev A.A. *Primenenie polevogo metoda matematicheskogo modelirovaniya pozharov v pomeshcheniyakh* [Application of the field method of mathematical modeling of indoor fires]: methodological recommendations. Moscow: FGBU VNIPO of EMERCOM of Russia, 2003. 35 p. (rus).
  18. Cameron A., Asimakopoulou E. Radiative heat transfer methodologies from compartment fires to adjacent walls: A numerical investigation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024. Vol. 2885. Article 012027. 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/2885/1/012027.
  19. 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.
  20. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal (AIAA Journal)*, 1994. Vol. 32, No. 8. Pp. 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.
  21. Snegirev A.Yu. *Modelirovanie teplomassoobmena i goreniya pri pozhare* [Modeling of heat and mass transfer and combustion in fire]: Grand PhD tech. sci. diss.: 01.04.14. Academy of Civil Aviation. Saint-Petersburg, 2004. 271 p. (rus)
  22. Magnussen B.F., Hjertager B.H., Olsen J.G., Bhaduri D. Effects of turbulent structure and local concentrations on soot formation and combustion in C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> diffusion flames. *Symposium (International) on Combustion*, 1979. Vol. 17, No. 1. Pp. 1383–1393. DOI: 10.1016/S0082-0784(79)80130-7.
  23. Fiveland W.A. Discrete-ordinates solutions of the radiative transport equation for rectangular enclosures. *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 1984. Vol. 106, No. 4. Pp. 699–706. DOI: 10.1115/1.3246741.
  24. Additional considerations in field modeling. *Computational fluid dynamics in fire engineering: Theory, modelling and practice*. Edited by: Guan Heng Yeoh, Kwok Kit Yuen. Butterworth-Heinemann, 2009. Chapter 3. Pp. 135–266. DOI: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.00003-X.
  25. Parsa V., Santiago A., Laim L. Computational fluid dynamics of compartment fires: A review of methods and applications. *Applied Sciences*, 2025. Vol. 15, No. 5. Article 2342. DOI: 10.3390/app15052342.

26. Fletcher D.F., Kent J.H., Apte V.B., Green A.R. Numerical simulation of smoke movement from a pool fire in a ventilated tunnel. *Fire Safety Journal*, 1994. Vol. 23, No. 3. Pp. 305–325. DOI: 10.1016/0379-7112(94)90033-7.
27. Further considerations in field modeling. *Computational fluid dynamics in fire engineering: Theory, modelling and practice*. Edited by: Guan Heng Yeoh, Kwok Kit Yuen. Butterworth-Heinemann, 2009. Chapter 4. Pp. 267–365. DOI: 10.1016/B978-0-7506-8589-4.00004-1.
28. Di Blasi C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008. Vol. 34, No. 1. Pp. 47–90. DOI: 10.1016/j.peccs.2006.12.001.
29. Kung H.C. A mathematical model of wood pyrolysis. *Combustion and Flame*, 1972. Vol. 18, No. 2. Pp. 185–195. DOI: 10.1016/S0010-2180(72)80134-2.
30. Esin V.M., Kalmykov S.P., Panov M.V. [et al.]. *Pozharnaya bezopasnost' v stroitel'stve* [Fire safety in construction]: textbook in 2 parts. Moscow: State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 2013. Part 1. *Pozharnaya bezopasnost' sistem otopeniya i ventilyatsii* [Fire safety of heating and ventilation systems]. 275 p. (rus)

Copyright © 2026 Palevoda I.I., Chorny A.D., Teteryukov A.V.

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