

Учет механизма тушения пламени в интегральных и зонных моделях расчета динамики опасных факторов пожара в помещении

© Д.А. Корольченко¹ ✉, С.В. Пузач²

- ¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26)
- ² Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

АННОТАЦИЯ

Введение. Для обоснования соответствия объемно-планировочных решений зданий и сооружений требованиям пожарной безопасности проводится расчет пожарного риска. Расчет времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара (ОФП) выполняется при условии свободного развития пожара. Единственной системой, работа которой принимается во внимание при превышении нормативной величины пожарного риска, является система противодымной вентиляции. Действие остальных систем пожарной безопасности не учитывается из-за отсутствия надежных инженерных методов расчета их влияния на развитие пожара. Проблема разработки модифицированных математических моделей расчета динамики распространения ОФП, учитывающих влияние процесса тушения на развитие пожара, является актуальной. Цель исследования — разработка общих принципов учета механизма тушения твердых материалов и горючих жидкостей огнетушащими веществами различной природы и степени дисперсности в интегральных и зонных моделях расчета динамики ОФП.

Методика расчета. Расчеты выполнены на основе уравнения законов сохранения массы и энергии в пламенной зоне, образующейся над поверхностью горючего материала.

Результаты исследования. Предложены общие принципы учета механизма тушения пламени в математических моделях расчета динамики ОФП. Представлены основные положения и параметры, необходимые для модификации существующих интегральной и зонной моделей при различных методах пожаротушения. Проведен расчет динамики ОФП с учетом механизма тушения пламени.

Выводы. На основании результатов исследования разработаны модифицированные интегральная и зонная модели, которые позволяют проводить расчет динамики ОФП с учетом механизма тушения твердых материалов и горючих жидкостей огнетушащими веществами различной природы и дисперсности.

Ключевые слова: горение; флегматизация; огнетушащие вещества; массовый расход; дисперсность

Для цитирования: Корольченко Д.А., Пузач С.В. Учет механизма тушения пламени в интегральных и зонных моделях расчета динамики опасных факторов пожара в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 2. С. 78–87. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.02.78-87

✉ Корольченко Дмитрий Александрович, e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Introduction of a flame suppression pattern into integrated and zone models used to analyze the dynamics of hazardous factors of indoor fires

© Dmitriy A. Korolchenko¹ ✉, Sergey V. Puzach²

- ¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation)
- ² The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)

ABSTRACT

Introduction. Fire risk calculation is performed to substantiate the compliance of space planning solutions of buildings and structures with fire safety requirements. The calculation of time needed for hazardous factors of fire to block evacuation routes is performed with account for unlimited fire propagation. The only system, whose operation is taken into account if the fire risk value is exceeded, is the smoke ventilation system. The operation

of other fire safety systems is disregarded due to the unavailability of reliable engineering methods of analysis of their influence on fire escalation. The problem of development of modified mathematical models, used to analyze the fire escalation pattern, with account to be taken of the process of fire extinguishing and its influence on fire propagation, is relevant. The purpose of this research is to develop common principles that allow to take account of the pattern of fire suppression in solid materials and combustible liquids by fire extinguishing substances having various origins and degrees of dispersion, if the fire extinguishing substances are added to integrated and zone models of development of hazardous factors of fire escalation.

Calculation methodology. The calculations are based on the equation compiled in furtherance of principles of conservation of mass and energy in the flame zone above the surface of the combustible material.

Research results. The co-authors suggest general principles for the introduction of a flame suppression pattern into integrated and zone models used to analyze the evolution of hazardous factors of indoor fires. The co-authors present the main provisions and parameters needed to modify integrated and zone models in case of different methods of fire extinguishing. The co-authors have analyzed hazardous factors of fire with account for the flame suppression pattern.

Conclusions. The co-authors applied the research findings to develop the modified integrated and zone models that allow to analyze the dynamics of hazardous factors of fire with account for the extinguishing of solid materials and combustible fluids by fire extinguishing substances having various origins and degrees of dispersion.

Keywords: combustion; oxygen reduction; fire extinguishing substances; mass flow; dispersiveness

For citation: Korolchenko D.A., Puzach S.V. Introduction of a flame suppression pattern into integrated and zone models used to analyze the dynamics of hazardous factors of indoor fires. *Pozharovzrybobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(2):78-87. DOI: 10.22227/PVB.2021.30.02.78-87 (rus).

✉ Dmitriy Aleksandrovich Korolchenko, e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Введение

Несмотря на применение передовых систем пожаротушения и новых огнетушащих веществ (ОТВ), пожары в жилом секторе и в производственных зданиях и сооружениях происходят регулярно, приводя к катастрофическим последствиям. Так, в последние годы произошли крупномасштабные пожары в Великобритании, Мексике и России, которые привели к жертвам среди обслуживающего персонала и пожарных [1–3].

Для обоснования соответствия объемно-планировочных решений зданий и сооружений требованиям пожарной безопасности проводится расчет пожарного риска [4–7]. В соответствии со ст. 79 Технического регламента о требованиях пожарной безопасности¹ риск гибели людей в результате воздействия опасных факторов пожара (ОФП) должен определяться с учетом функционирования систем обеспечения пожарной безопасности зданий, сооружений и строений.

В Методике определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности (далее — Методика)² при расчете пожарных рисков действие систем пожарной безопасности учитывается заданием вероятностей эффективной работы каждой из них. Однако расчет времени бло-

кирования путей эвакуации опасными факторами пожара как составная часть расчета риска выполняется при условии свободного развития пожара [8, 9]. Единственной системой, работа которой принимается во внимание при превышении нормативной величины пожарного риска, является система противодымной вентиляции. Действие остальных систем пожарной безопасности не учитывается, в первую очередь, из-за отсутствия надежных инженерных методов расчета их влияния на развитие пожара.

В связи с вышеизложенным проблема разработки модифицированных математических моделей расчета динамики распространения ОФП (далее — динамики ОФП), учитывающих влияние процесса тушения на развитие пожара, является весьма актуальной.

В отечественных [10–13] и зарубежных [14] работах, посвященных моделированию динамики ОФП, рассматривается только один способ тушения пламени — объемное тушение инертным газом.

Исследованию закономерностей тушения пламени различными способами посвящено большое количество работ [15–18]. Однако их авторы, как правило, занимались изучением только одного типа из всех известных ОТВ, поэтому вопрос о выявлении общих принципов, сопровождающих процесс тушения пламени, не возникал.

Целью настоящего исследования является разработка общих принципов учета механизма тушения твердых материалов и горючих жидкостей огнетушащими веществами различной природы и дисперсности в интегральных и зонных моделях расчета динамики ОФП. Для этого внесем параметры, учитывающие механизм тушения пламени, в интегральную и зонную модели пожара.

¹ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон № 123-ФЗ от 22 июля 2008 г. (ст. 3579): принят Государственной Думой 4 июля 2008 г.; одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 г.

² Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: утверждена приказом МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382.

Расчет динамики опасных факторов пожара с учетом механизма тушения пламени

В интегральной и зонной моделях расчета динамики ОФП [19] параметры процесса тушения пламени в общем случае должны учитываться при решении основных уравнений моделей и определении входящих в них параметров:

- тепловыделение при пожаре $Q_{\text{пож}}$, Вт: $Q_{\text{пож}} = \eta \Psi Q_n^p$
- полнота сгорания η ;
- массовая скорость выгорания горючего материала (ГМ) Ψ , кг/с: $\Psi = \Psi_{\text{уд}} F_{\text{ГМ}}$;
- удельная массовая скорость выгорания ГМ $\Psi_{\text{уд}}$, кг/(с·м²);
- площадь поверхности горения ГМ $F_{\text{ГМ}}$, м²;
- низшая рабочая теплота сгорания горючего материала Q_n^p Дж/кг;
- массовый расход ОТВ $G_{\text{ОТВ}}$, кг/с;
- коэффициент теплопотерь за счет фазовых переходов и нагрева ОТВ φ_t .

В таблице и на рис. 1 представлены основные положения моделей расчета динамики ОФП и параметры, необходимые для модификации существующих интегральной и зонной моделей при различных методах пожаротушения.

Модификация интегральной модели пожара с учетом механизма тушения пламени

Уравнение закона сохранения массы для газовой среды помещения имеет вид [20, 21]:

$$V \frac{dp_m}{d\tau} = \psi + G_a + \rho_a W_a + G_{\text{ОТВ}} - G_m - \rho_m W_m, \quad (1)$$

где V — объем помещения, м³;

ρ_m — среднееобъемная плотность газовой среды, кг/м³;

τ — время, с;

G_a, G_m — массовый расход соответственно поступающего воздуха и вытекающих наружу газов при естественном газообмене через открытые проемы, кг/с;

ρ_a — плотность наружного воздуха, кг/м³;

W_a, W_m — объемный расход систем соответственно приточной вентиляции и дымоудаления, м³/с.

Уравнение закона сохранения энергии для газовой среды помещения можно записать как:

$$\begin{aligned} \frac{V}{k_m - 1} \frac{dp_m}{d\tau} = & \eta \Psi Q_n^p (1 - \varphi - \varphi_t) + \\ & + c_{pa} T_a (G_a + \rho_a W_a) + c_{p\text{ОТВ}} T_{\text{ОТВ}} G_{\text{ОТВ}} - \\ & - c_{pm} T_m (G_m + \rho_m W_m) - Q_{\Sigma} - Q_{\text{пр}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где k_m — отношение изобарной и изохорной теплоемкостей идеального газа;

φ — коэффициент теплопотерь, $j = (Q_s + Q_{\text{пр}})/Q_{\text{пож}}$;

Q_{Σ} — суммарный тепловой поток, отводимый в ограждающие конструкции от газовой среды,

Вт, $Q_{\Sigma} = Q_c + Q_w + Q_f$;

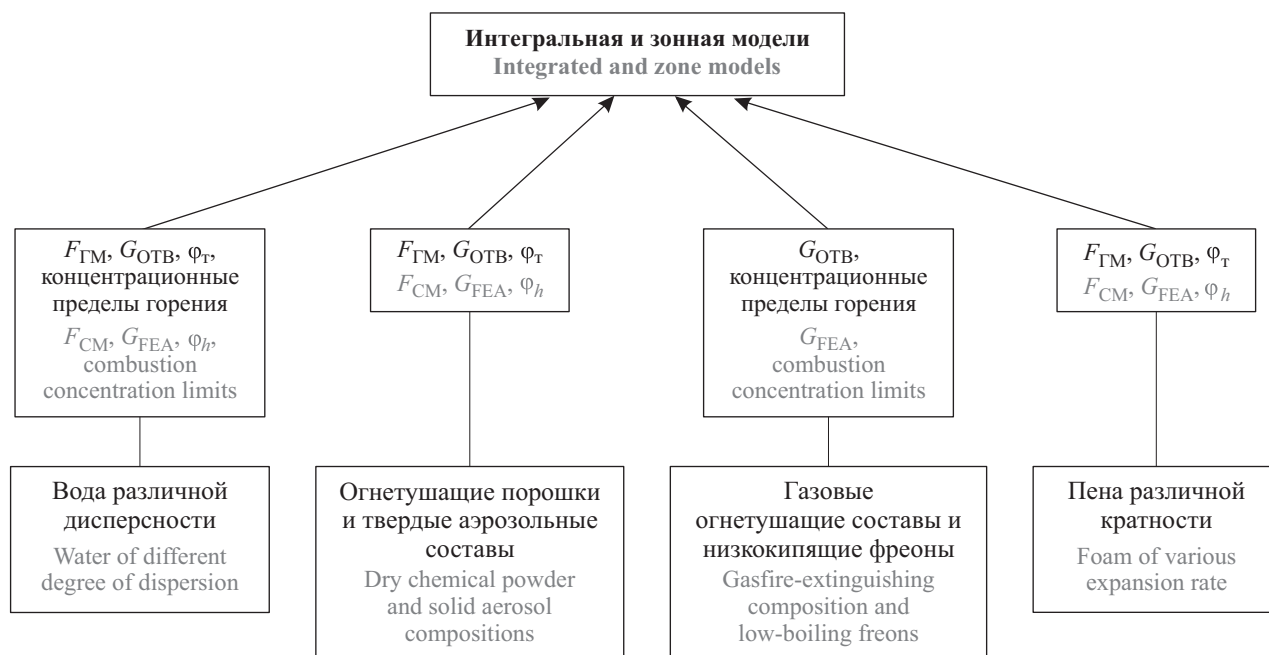


Рис. 1. Основные параметры, необходимые для модификации интегральной и зонной моделей расчета динамики ОФП при различных методах пожаротушения

Fig. 1. The main parameters required for modifying the integral and zone models used to calculate the dynamics of hazardous fire factors for various fire extinguishment methods

Основные положения моделей расчета динамики ОФП и параметры, необходимые для модификации существующих интегральной и зонной моделей расчета динамики ОФП при различных методах пожаротушения / The fundamental principles of the models for calculating the dynamics of hazardous fire factors and the parameters necessary for modifying the existing integral and zone models for calculating the dynamics of hazardous fire factors for various fire extinguishment methods

Положение Situation	Интегральная модель Integrated model				Зонная модель Zone model			
	Вода различной дисперсности Water of different degree of dispersion	Огнетушащие порошки и твердые аэрозольные составы Dry chemical powder and solid aerosol compositions	Газовые огнетушащие составы и низкотеплостойкие фреоны Gas fire-extinguishing composition and low-boiling freons	Пена различной кратности Foam of various expansion rate	Вода различной дисперсности Water of different degree of dispersion	Огнетушащие порошки и твердые аэрозольные составы Dry chemical powder and solid aerosol compositions	Газовые огнетушащие составы и низкотеплостойкие фреоны Gas fire-extinguishing composition and low-boiling freons	Пена различной кратности Foam of various expansion rate
Уравнения, в которых учитываются параметры, характеризующие процесс тушения What equations take into account the parameters characterizing the extinguishing process	1. Уравнение закона сохранения массы газовой среды 2. Уравнение энергии 3. Уравнение закона сохранения массы ОТВ 1. Equation of the law of conservation of mass of atmosphere 2. Energy equation 3. Equation of mass conservation of the extinguishing medium	Уравнение энергии (твердые частицы быстро оседают, отсутствуют в газовой среде помещения) Energy equation (solid particles settle quickly, they are absent in the atmosphere of the room)	1. Уравнение закона сохранения массы газовой среды 2. Уравнение энергии 3. Уравнение закона сохранения массы ОТВ 1. Equation of the law of conservation of mass of atmosphere 2. Energy equation 3. Equation of mass conservation of the extinguishing medium	Уравнение энергии Energy equation	1. Уравнение расхода по высоте конвективной колонки 2. Уравнение скорости опускания припотолочного слоя 1. The equation of the flow distribution along the height of the convective column 2. Equation describing the pace of lowering the layer beneath a ceiling	Уравнение расхода по высоте конвективной колонки 2. Уравнение скорости опускания припотолочного слоя 1. The equation of the flow distribution along the height of the convective column 2. Equation of lowering the rate of lowering a layer beneath a ceiling	1. Уравнение расхода по высоте конвективной колонки 2. Уравнение скорости опускания припотолочного слоя 1. The equation of the flow distribution along the height of the convective column 2. Equation of lowering the rate of lowering a layer beneath a ceiling	Уравнение распределения расхода по высоте конвективной колонки The equation of the rate distribution along the height of the convective column
Параметры, характеризующие процесс тушения Parameters characterizing the extinguishing process	$G_{\text{отв}}, F_{\text{ГМ}}, \varphi_{\text{т}}$ $G_{\text{FEA}}, F_{\text{CM}}, \varphi_h$	$G_{\text{отв}}, F_{\text{ГМ}}, \varphi_{\text{т}}$ $G_{\text{FEA}}, F_{\text{CM}}, \varphi_h$	$G_{\text{отв}}$ G_{FEA}	$G_{\text{отв}}, F_{\text{ГМ}}, \varphi_{\text{т}}$ $G_{\text{FEA}}, F_{\text{CM}}, \varphi_h$	$G_{\text{отв}}, F_{\text{ГМ}}, \varphi_{\text{т}}$ $G_{\text{FEA}}, F_{\text{CM}}, \varphi_h$	$G_{\text{отв}}$ G_{FEA}	$G_{\text{отв}}, F_{\text{ГМ}}, \varphi_{\text{т}}$ $G_{\text{FEA}}, F_{\text{CM}}, \varphi_h$	$G_{\text{отв}}, F_{\text{ГМ}}, \varphi_{\text{т}}$ $G_{\text{FEA}}, F_{\text{CM}}, \varphi_h$
Дополнительные соотношения Additional correlations	Концентрационные пределы горения Combustion concentration limits	–	Концентрационные пределы горения Combustion concentration limits	–	Концентрационные пределы горения Combustion concentration limits	–	Концентрационные пределы горения Combustion concentration limits	–

$Q_{пр}$ — тепловой поток, излучаемый через открытые проемы наружу, Вт;

Q_c, Q_w, Q_f — суммарные тепловые потоки, отводимые соответственно в потолок, стены и пол, Вт;

c_{pa}, c_{pm}, c_{pOTB} — удельная изобарная теплоемкость соответственно воздуха, газовой среды и огнетушащего вещества, Дж/(кг·К);

T_a, T_{OTB} — температура соответственно наружного воздуха и огнетушащего вещества, К.

Уравнение закона сохранения массы кислорода можно записать как [20, 21]:

$$V \frac{d(X_{O_2m} \rho_m)}{d\tau} = X_{O_2a} G_a + X_{O_2a} \rho_a W_a - \eta L_{O_2} \Psi - X_{O_2m} G_m - X_{O_2m} \rho_m W_m, \quad (3)$$

где X_{O_2m} — среднеобъемная массовая концентрация кислорода в помещении;

X_{O_2a} — среднеобъемная массовая концентрация кислорода в наружном воздухе;

L_{O_2} — удельный массовый коэффициент потребления кислорода при сгорании 1 кг горючего материала.

Уравнение закона сохранения массы i -го продукта горения имеет вид:

$$V \frac{d(X_{im} \rho_m)}{d\tau} = \eta L_i \Psi - X_{im} G_m - X_{im} \rho_m W_m, \quad (4)$$

где X_{im} — среднеобъемная массовая концентрация i -го продукта горения;

L_i — удельный массовый коэффициент образования i -го продукта горения при сгорании 1 кг горючего материала.

Уравнение закона сохранения оптической плотности дыма:

$$V \frac{d\mu_{sm}}{d\tau} = D_s \Psi - \mu_{sm} \frac{G_m + \rho_m W_m}{\rho_m}, \quad (5)$$

где μ_{sm} — среднеобъемная оптическая плотность дыма, Нп/м;

D_s — дымообразующая способность горючего материала по оптической плотности дыма, Нп·м²/кг.

Уравнение баланса массы инертного газа, используемого в качестве ОТВ (газовые огнетушащие составы и низкокипящие фреоны), имеет вид [20, 21]:

$$V \frac{d(X_{OTBm} \rho_m)}{d\tau} = G_{OTB} + X_{OTBa} G_a + X_{OTBa} \rho_a W_a - X_{OTBm} G_m - X_{OTBm} \rho_m W_m, \quad (6)$$

где X_{OTBm}, X_{OTBa} — среднеобъемная массовая концентрация ОТВ соответственно в помещении и в наружном воздухе.

Массовый расход продуктов газификации горючего материала Ψ в уравнениях (1) и (2), поступающих в пламенную зону, при постоянной величине удельной массовой скорости выгорания ГМ в зависимости от вида ОТВ в соответствии с таблицей определяется площадью открытой поверхности горения $F_{ГМ}$, м²:

- огнетушащие порошки и твердые аэрозольные составы, пена различной кратности: $F_{ГМ} = f_1(\tau)$;
- вода различной дисперсности: $F_{ГМ} = f_2(\tau)$;
- газовые огнетушащие составы и низкокипящие фреоны: $F_{ГМ} = F_{ГМ.0}$ (где $F_{ГМ.0}$ — площадь поверхности горения ГМ в отсутствие слоя ОТВ на ее поверхности, м²).

Массовый расход ОТВ G_{OTB} в уравнениях (7)–(11) в зависимости от его вида в соответствии с таблицей составляет:

- огнетушащие порошки и твердые аэрозольные составы, пена различной кратности: $G_{OTB} = 0$;
- вода различной дисперсности: $G_{OTB} = G_{fw} + \beta G_{sw}$;
- газовые огнетушащие составы и низкокипящие фреоны: $G_{OTB} = G_{sum}$ (где G_{fw} — массовый расход воды, поступающей в пламенную зону, кг/с; G_{sw} — массовый расход воды, попадающей на поверхность ГМ и образующей на ней пленку пара, кг/с; β — доля массового расхода воды G_{sw} , поступающей в пламенную зону под воздействием продуктов газификации ГМ на его поверхности; G_{sum} — массовый расход ОТВ, поступающего в зоны конвективной колонки и припотолочного слоя, кг/с).

Система дифференциальных уравнений (1)–(6) учитывает конкретный механизм тушения пламени через величины $F_{ГМ}$, G_{OTB} и φ_τ , которые получены в работах [22–26].

Модификация зонной модели пожара с учетом механизма тушения пламени

Зонные математические модели в основном используются для исследования динамики ОФП на начальной стадии пожара.

Схема тепломассообмена в зонной модели с учетом механизма тушения пламени представлена на рис. 2.

В соответствии с таблицей параметры процесса тушения учитываются в уравнениях распределения расхода по высоте конвективной колонки и скорости опускания припотолочного слоя.

Эмпирические и полуэмпирические формулы для расчета массового расхода по высоте конвективной колонки имеют вид соответственно [17, 22, 23]:

$$G = 0,21 \left[\frac{g \rho_0^2 Q_{\text{пож}}}{c_p T_0} - (1 - \varphi_1) \right]^{\frac{1}{3}} (z + z_0)^{\frac{5}{3}}; \quad (7)$$

$$\frac{dG}{dz} = \frac{B_{\text{кк}} z (r_{\text{экв}} + z \operatorname{tg} \gamma)^4}{T_0 G A_{\text{кк}} (B_{\text{кк}} z + G T_0)} + \frac{2G \operatorname{tg} \gamma}{r_{\text{экв}} + z \operatorname{tg} \gamma} - \frac{B_{\text{кк}}}{T_0} \left(1 - \frac{2z \operatorname{tg} \gamma}{r_{\text{экв}} + z \operatorname{tg} \gamma} \right); \quad (8)$$

при $z \leq z_{\text{пл}}$:

$$G = 0,071 \left(\frac{Q_{\text{пож}} (1 - \varphi_1)}{1000} \right)^{\frac{1}{3}} z^{\frac{5}{3}} + 1,8 \cdot 10^{-6} Q_{\text{пож}} (1 - \varphi_1); \quad (9)$$

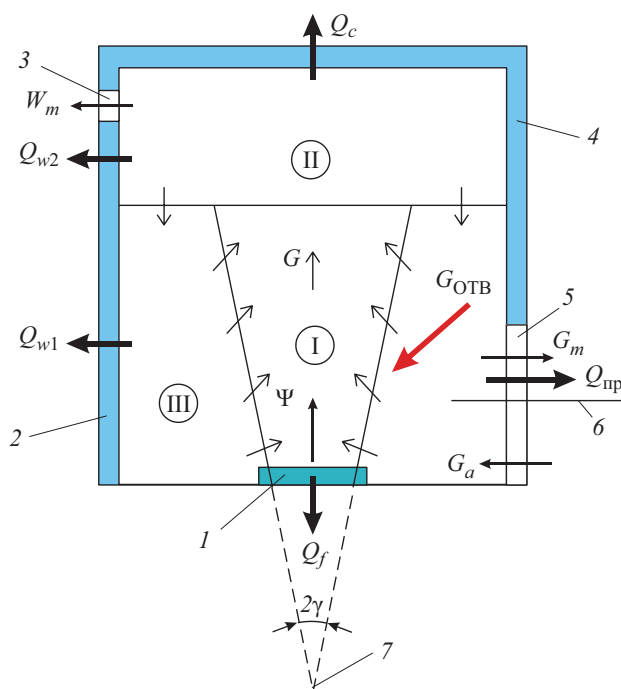


Рис. 2. Схема тепломассообмена в помещении при использовании зонной модели: 1 — горючий материал; 2 — стены; 3 — система дымоудаления; 4 — перекрытие; 5 — открытый проем; 6 — нейтральная плоскость; 7 — фиктивный источник теплоты; γ — угол полуоткрытия конвективной колонки; I — зона конвективной колонки; II — зона нагретого задымленного припотолочного слоя; III — зона холодного воздуха

Fig. 2. The flow diagram describing heat and mass transfer inside a room if the zone model is used: 1 — combustible material; 2 — walls; 3 — smoke exhaust system; 4 — floor; 5 — open doorway; 6 — neutral plane; 7 — fictitious thermal source; γ — the half-opening angle of the convective column; I — convection column zone; II — zone of heated smoke layer beneath a ceiling; III — cold air zone

при $z > z_{\text{пл}}$:

$$G = 0,032 \left(\frac{Q_{\text{пож}} (1 - \varphi_1)}{1000} \right)^{\frac{3}{5}} z, \quad (10)$$

где G — расход газов через поперечное сечение струи, отстоящее по высоте от поверхности горения на расстояние z , кг/с;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

ρ_0 — плотность холодного (окружающего) воздуха, кг/м³;

c_p — изобарная теплоемкость газа, Дж/(кг·К);

T_0 — температура окружающего воздуха, К;

φ_1 — коэффициент теплопотерь в конвективной колонке; $\varphi_1 = Q_{\Sigma I} / Q_{\text{пож}} + \varphi_T$;

$Q_{\Sigma I}$ — суммарный тепловой поток, отводимый из конвективной колонки в ограждающие конструкции, Вт;

z — координата сечения колонки, отсчитываемая от поверхности горения, м;

z_0 — расстояние от фиктивного источника тепла до поверхности горения, м;

$A_{\text{кк}}$ — размерный параметр, с²·м⁵/(кг²·К),

$$A_{\text{кк}} = A_{\text{кк}2} \operatorname{tg}^4 \gamma = \frac{R_0^2 T_0}{g \rho_0^2 \pi^2};$$

$B_{\text{кк}}$ — размерный параметр, кг·К/(м·с),

$$B_{\text{кк}} = \frac{Q_{\text{пож}} (1 - \varphi_1)}{z_{\text{пл}} c_p};$$

$z_{\text{пл}}$ — высота пламенной зоны, м,

$$z_{\text{пл}} = 0,166 \left(\frac{Q_{\text{пож}} (1 - \varphi_1)}{1000} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$r_{\text{экв}}$ — радиус поверхности горючего материала, м.

Уравнение для определения зависимости высоты нижней границы припотолочного слоя от времени с момента начала пожара имеет вид:

$$-F_{\text{пот}} \rho_0 \frac{dz_k}{d\tau} = \left[(1 - \varphi - \varphi_T) \frac{Q_{\text{пож}}}{c_p T_0} + G_k + G_{\text{отв}} \right], \quad (11)$$

где $F_{\text{пот}}$ — площадь потолка, м²;

ρ_0 — плотность воздуха в помещении перед пожаром, кг/м³;

z_k — координата нижнего края припотолочного слоя газов, м;

φ — коэффициент теплопотерь во всем помещении;

G_k — расход газовой смеси в поперечном сечении конвективной колонки на высоте z_k , кг/с.

Массовый расход огнетушащего вещества в уравнениях (7)–(11) в зависимости от его вида в соответствии с таблицей составит:

- огнетушащие порошки и твердые аэрозольные составы, пена различной кратности: $G_{\text{отв}} = 0$;

- вода различной дисперсности: $G_{\text{OTB}} = G_{\text{fw}} + \beta G_{\text{sw}}$;
- газовые огнетушащие составы и низкокипящие фреоны: $G_{\text{OTB}} = G_{\text{sum}}$.

Массовый расход продуктов газификации ГМ Ψ в уравнениях (7)–(11), поступающих в пламенную зону, при постоянной величине удельной массовой скорости выгорания ГМ в зависимости от вида ОТВ в соответствии с таблицей определяется площадью открытой поверхности горения:

- огнетушащие порошки и твердые аэрозольные составы, пена различной кратности: $F_{\text{ГМ}} = f_1(\tau)$;
- вода различной дисперсности: $F_{\text{ГМ}} = f_2(\tau)$;
- газовые огнетушащие составы и низкокипящие фреоны: $F_{\text{ГМ}} = F_{\text{ГМ.о}}$.

Система уравнений (7)–(11) учитывает конкретный механизм тушения пламени через величины $F_{\text{ГМ}}$, G_{OTB} и φ , которые получены в работах [20, 21].

Выводы

Таким образом, разработанные модифицированные интегральная и зонная модели позволяют проводить расчет динамики опасных факторов пожара с учетом механизма тушения твердых материалов и горючих жидкостей огнетушащими веществами различной природы и дисперсности (огнетушащими порошками, твердыми аэрозольными составами, пенами различной кратности, водой различной дисперсности, газовыми огнетушащими составами и низкокипящими фреонами).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Halloul Y., Chiban S., Awad A. Adapted fuzzy fault tree analysis for oil storage tank fire // Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2019. Vol. 41. No. 8. Pp. 948–958. DOI: 10.1080/15567036.2018.1522393
2. Chettouh S., Hamzi R., Benaroua K. Examination of fire and related accidents in Skikda oil refinery for the period 2002–2013 // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. Vol. 41. Pp. 186–193. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.03.014
3. Краснов А.В., Садыкова З.Х., Пережогин Д.Ю., Мухин И.А. Статистика чрезвычайных происшествий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности за 2007–2016 гг. // Нефтегазовое дело. 2017. № 6. С. 179–191. DOI: 10.17122/ogbus-2017-6-179-191
4. Парфененко А.П. Проблемы эвакуации детей и подростков при пожарах // Технологии технологической безопасности. 2010. № 5(33). С. 48–52. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_16322624_45477273.pdf
5. Парфененко А.П. Методология моделирования людских потоков и практика программирования их движения при эвакуации // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2014. Т. 23. № 12. С. 46–55. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25866632>
6. Lyapin A., Korolchenko A., Meshalkin E. Expediency of application of explosion-relief constructions to ensure explosion resistance of production buildings // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 86. P. 04029. DOI: 10.1051/matecconf/20168604029
7. Корольченко О.Н. Дымообразование при горении огнезащитенной древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2008. Т. 17. № 1. С. 20–22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12510577>
8. Komarov A.A., Gromov N.V., Korolchenko O.N. Ensuring blast resistance of critically important buildings and constructions in case of air crash // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1066. No. 1. P. 012005. DOI: 10.1088/1757-899x/1066/1/012005
9. Василенко В.В., Леликов Г.Д., Жердев К.В. Влияние растворов кислот на остаточную прочность страховочно-спасательных веревок // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 2. С. 38–44. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-2-38-44
10. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф., Дегаев Е.Н., Власов Н.А., Мельников А.И. Тушение пламени горючих жидкостей химически активным ингибитором // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 11. С. 70–76. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.70-76
11. Sharovarnikov A.F., Korol'chenko D.A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 475–476. Pp. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344
12. Bolodian I.A., Shebeko Yu.N., Molchanov V.P., Deshevih Yu.I. et al. An estimation of fire and explosion hazard of large tanks for liquefied natural gas // Proceedings of the 9th International Conference on Fire Science and Engineering. Edinburgh. 2001. Vol. 2. Pp. 1309–1314.
13. Корольченко А.Я., Шилина Е.Н. Газовое пожаротушение // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 5. С. 57–65. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.57-65

14. Kuligowski E.D. NIST Technical Note 1644. Compilation of data on the sublethal effects of fire effluent. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2009. 47 p.
15. Шароварников А.Ф., Корольченко Д.А. Тушение горючих жидкостей распыленной водой // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2013. Т. 22. № 11. С. 70–74. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20655296>
16. Шароварников А.Ф., Корольченко Д.А. Влияние дисперсности капель воды на эффективность тушения пожаров горючей жидкостью // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2013. Т. 22. № 12. С. 69–74. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21009234&>
17. Корольченко Д.А., Дегаев Е.Н., Шароварников А.Ф. Горение гептана в модельном резервуаре // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 2. С. 67–70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23417404>
18. Снегирев А.Ю., Сажин С.С., Талалов В.А. Модель и алгоритм расчета теплообмена и испарения капель диспергированной жидкости // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2011. № 1. С. 44–55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-i-algoritm-rascheta-teploobmena-i-ispareniiya-kapel-dispergirovannoy-zhidkosti/viewer>
19. Кошмаров Ю.А., Пузач С.В., Андреев В.В., Козлов Ю.И. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учебное пособие. М. : Академия ГПС МВД России, 2012. 126 с.
20. Моделирование пожаров и взрывов / под ред. Н.Н. Брушлинского, А.Я. Корольченко. М. : Пожнаука, 2000. 482 с.
21. Пузач С.В. Математическое моделирование газодинамики и теплообмена при решении задач пожаровзрывобезопасности. М. : Академия ГПС МЧС России, 2002. 150 с.
22. Пузач С.В., Колодяжный С.А., Колосова Н.В. Модифицированная зонная модель расчета термогазодинамики пожара в помещении, учитывающая форму конвективной колонки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. Т. 24. № 12. С. 33–39. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.33-39
23. Startseva N.A., Kolodyazhny S.A. Fire safety in designing pump stations and compressor houses // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2008; 2:155.
24. NFPA 92B. 1990 NFPA Technical Committee Reports — Technical Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Areas. Quincy, MA : National Fire Protection Association, 1990.
25. Barrazo C.L., Bula A.J., Palencia A. Modeling and numerical solution of coal and natural gas combustion in a rotary kiln // Combustion Science and Technology. 2012. Vol. 184. No. 1. Pp. 26–43. DOI: 10.1080/00102202.2011.615769
26. Xiaoni Qi, Yongqi Liu, Hongqin Xu, Zeyan Liu, Ruixiang Liu. Modeling thermal oxidation of coal mine methane in a non-catalytic reverse-flow reactor // Strojniški vestnik — Journal of Mechanical Engineering. 2014. Vol. 60. No. 7–8. Pp. 495–505. DOI: 10.5545/sv-jme.2013.1393

REFERENCES

1. Halloul Y., Chiban S., Awad A. Adapted fuzzy fault tree analysis for oil storage tank fire. *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2019; 41(8):948-958. DOI: 10.1080/15567036.2018.1522393
2. Chettouh S., Hamzi R., Benaroua K. Examination of fire and related accidents in Skikda oil refinery for the period 2002-2013. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2016; 41:186-193. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.03.014
3. Krasnov A.V., Sadykova Z.Kh., Perezhogin D.Yu., Mukhin I.A. Statistics of emergency accidents in the refining and petrochemical industry for the 2007-2016 years. *Oil and Gas Business*: 2017; 6:179-191. DOI: 10.17122/ogbus-2017-6-179-191 (rus).
4. Parfenenko A.P. Problems of evacuation of children and teenagers under fire. *Technology of Technosphere Safety*. 2010; 5(33):48-52. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_16322624_45477273.pdf (rus).
5. Parfenenko A.P. Methodology for modeling human movements and practice of programming their movement during evacuation. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2014; 23(12):46-55. (rus).
6. Lyapin A., Korolchenko A., Meshalkin E. Expediency of application of explosion-relief constructions to ensure explosion resistance of production buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 86:04029. DOI: 10.1051/mateconf/20168604029

7. Korolchenko O.N. Smoke formation when burning fire-resistant wood. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2008; 17(1):20-22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12510577> (rus).
8. Komarov A.A., Gromov N.V., Korolchenko O.N. Ensuring blast resistance of critically important buildings and constructions in case of air crash. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1066(1):012005. DOI: 10.1088/1757-899x/1066/1/012005
9. Vasilenko V.V., Lelikov G.D., Zherdev K.V. Effect of acid solutions on the residual strength of safety and rescue ropes. *Occupational Safety in Industry*. 2020; 2:38-44. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-2-38-44 (rus).
10. Korolchenko D.A., Sharovarnikov A.F., Degaev E.N., Vlasov N.A., Mel'nikov A.I. Suppression of a flame of combustible liquids by reaction inhibitor. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(11):70-76. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.70-76 (rus).
11. Sharovarnikov A.F., Korolchenko D.A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings. *Applied Mechanics and Materials*. 2013; 475-476:1344-1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344
12. Bolodian I.A., Shebeko Yu.N., Molchanov V.P., Deshevii Yu.I. et al. An estimation of fire and explosion hazard of large tanks for liquefied natural gas. *Proceedings of the 9th International Conference on Fire Science and Engineering*. Edinburgh. 2001; 2:1309-1314.
13. Korolchenko A. Ya., Shilina E. N. Gas extinguishing. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2016; 25(5):57-65. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.57-65 (rus).
14. Kuligowski E.D. *NIST Technical Note 1644. Compilation of data on the sublethal effects of fire effluent*. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2009; 47.
15. Sharovarnikov S.A., Korolchenko D.A. Extinguishing of combustible liquid by atomized water. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 22(11):70-74. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20655296> (rus).
16. Sharovarnikov A.F., Korolchenko D.A. Impact of dispersion of water drops on the efficiency of fire extinguishing of combustible liquid. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2013; 22(12):69-74. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21009234&> (rus).
17. Korol'chenko D.A., Degaev E.N., Sharovarnikov A.F. Combustion of heptane in a model tank. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(2):67-70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23417404> (rus).
18. Snegirev A.Yu., Sazhin S.S., Talalov V.A., Snegirev A.Yu., Sazhin S.S., Talalov V.A. Model and algorithm of estimate of heat transfer and evaporation of dispersed liquid's drops. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2011; 1:44-55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-i-algoritm-rascheta-teploobmena-i-ispareniya-kapel-dispergirovannoy-zhidkosti/viewer> (rus).
19. Koshmarov Yu.A., Puzach S.V., Andreev V.V., Kozlov Yu.I. *The prediction of dangerous fire factors in the room*. Moscow, Academy of State Fire Service of Ministry of Internal Affairs of Russia Publ., 2012; 126. (rus).
20. *Modeling of fires and explosions*. Brushlinskiy N.N., Korolchenko A.Ya. (eds). Moscow, Pozhnauka Publ., 2000; 482. (rus).
21. Puzach S.V. *Mathematical modeling of gas dynamics and heat transfer in solving problems of fire and explosion safety*. Moscow, Academy of State Fire Service of Emercom of Russia, 2002; 150. (rus).
22. Puzach S.V., Kolodyazhnyy S.A., Kolosova N.V. Modified zonal model for calculating of the fire gas dynamics in the room taking into account the form of convective column. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(12):33-39. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.33-39 (rus).
23. Startseva N.A., Kolodyazhny S.A. Fire safety in designing pump stations and compressor houses. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*, 2008; 2:155.
24. *NFPA 92B. 1990 NFPA Technical Committee Reports — Technical Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Areas*. Quincy, MA, National Fire Protection Association, 1990.
25. Barrazo C.L., Bula A.J., Palencia A. Modeling and numerical solution of coal and natural gas combustion in a rotary kiln. *Combustion Science and Technology*. 2012; 184(1):26-43. DOI: 10.1080/00102202.2011.615769
26. Xiaoni Qi, Yongqi Liu, Hongqin Xu, Zeyan Liu, Ruixiang Liu. Modeling thermal oxidation of coal mine methane in a non-catalytic reverse-flow reactor. *Strojniški vestnik — Journal of Mechanical Engineering*. 2014; 60(7-8):495-505. DOI: 10.5545/sv-jme.2013.1393

Поступила 15.03.2021, после доработки 30.03.2021; принята к публикации 12.04.2021
Received March 15, 2021; Received in revised form March 30, 2021; Accepted April 12, 2021

Информация об авторах

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, директор Института комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 18265; Scopus Author ID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Information about the authors

Dmitriy A. KOROLCHENKO Cand. Sci. (Eng.), Docent, Head of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Head of Institute of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Sergey V. PUZACH Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation; ID RISC: 18265; Scopus Author ID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru