

Новый подход к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре в помещении

© С.В. Пузач¹✉, В.М. Мустафин^{1,2}, Р.Г. Акперов¹

¹ 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)

² Академия гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан (Республика Казахстан, 020000, г. Кокшетау, ул. Акан Серэ, 136)

АННОТАЦИЯ

Введение. Точность расчета дальности видимости при пожаре в помещении существенно зависит от величины дымообразующей способности веществ и материалов, полученной экспериментально в маломасштабных установках. Поэтому для нахождения дальности видимости в полномасштабном помещении актуальной задачей является разработка метода расчета, позволяющего учесть масштабный фактор и не использующего удельный коэффициент дымообразования.

Цели и задачи. Целью данной работы является разработка нового подхода к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости, учитывающего масштабный фактор и не использующего удельный коэффициент дымообразования. Для ее достижения проведен анализ схем развития пожара в маломасштабном и полномасштабном помещениях, для этих схем получены теоретические зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от других среднеобъемных параметров газовой среды помещения и выполнено сравнение результатов расчетов по полученным зависимостям с экспериментальными данными.

Методы. Решение нестационарных уравнений законов сохранения энергии газовой среды в помещении, оптической плотности дыма и массы кислорода при закрытой и открытой схемах теплообмена в помещении. Проведение огневых испытаний в маломасштабной установке. Сравнение теоретических и экспериментальных данных.

Результаты. Получены аналитические зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры и среднеобъемной парциальной плотности кислорода для закрытой и открытой схем протекания пожара в помещении. Проведена серия огневых испытаний кабелей ВВГнг при различной плотности падающего на образец теплового потока. Получены экспериментальные зависимости от времени оптической плотности дыма и удельного коэффициента дымообразования. Выполнено сравнение результатов расчета среднеобъемной оптической плотности дыма по предложенным аналитическим выражениям с экспериментальными данными.

Выводы. Предлагается использовать экспериментальные зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры или среднеобъемной парциальной плотности кислорода, полученные в маломасштабной установке, не решая дифференциального уравнения закона сохранения оптической плотности дыма.

Ключевые слова: дымообразующая способность; коэффициент дымообразования; оптическая плотность дыма; горение; дальность видимости

Для цитирования: Пузач С.В., Мустафин В.М., Акперов Р.Г. Новый подход к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 3. С. 76–87. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.76-87

✉ Пузач Сергей Викторович, e-mail: puzachsv@mail.ru

A new approach to calculating the time to the blocking of the escape routes due to the loss of visibility in the smoke of an indoor fire

© Sergey V. Puzach¹✉, Valikhan M. Mustafin^{1,2}, Ruslan G. Akperov¹

¹ 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)

² Academy of Civil Protection. M. Gabdullina Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan (Akan Sera St., 136, Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan)

ABSTRACT

Introduction. The accuracy of the visibility analysis in the event of an indoor fire strongly depends on the smoke-generating ability of substances and materials obtained experimentally in small-scale units. Therefore, the task is to develop a method of analysis that takes account of the scale factor and does not use the specific coefficient of smoke generation to identify the range of visibility in a full-scale room.

Goals and objectives. The goal of the research project is a new approach to the calculation of the time to the blocking of the escape routes due to the loss of visibility with due regard for the scale factor and without regard for the specific coefficient of smoke generation.

To achieve this goal, the analysis of fire development patterns in small-scale and full-scale rooms was carried out; theoretical dependences between the volumetric average optical smoke density and other volumetric average parameters of the indoor gas environment were obtained for these patterns, and calculation results, based on the obtained dependences, were compared with the experimental data.

Methods. Methods, employed by the co-authors, included solving non-stationary equations based on the principle of conservation of indoor gas energy, optical density of smoke and oxygen mass for the cases of closed and open-type indoor heat and mass transfer. Fire tests were conducted in a small-scale facility. Theoretical and experimental data were compared.

Results. Analytical dependences between the volumetric average optical density of smoke, a change in the volumetric average temperature, and the volumetric average partial oxygen density for closed and open indoor fire patterns were obtained.

The series of fire tests involving the PVC insulated and sheathed bare (coverless) cable, exposed to the effect of the varying density incident heat flux, were carried out. Experimental dependences between the time, the optical density of smoke, and the specific coefficient of smoke generation were obtained.

The obtained volumetric average optical density of smoke was compared with the experimental data using the proposed analytical expressions.

Conclusions. The co-authors suggest using experimental dependences between the volumetric average optical density of smoke, changes in the volumetric average temperature or the volumetric average partial oxygen density obtained in a small-scale facility without solving the differential equation based on the principle of conservation of optical density of smoke.

Keywords: smoke generation ability; smoke generation coefficient; optical density of smoke; burning; visibility range

For citation: Puzach S.V., Mustafin V.M., Akperov R.G. A new approach to calculating the time to the blocking of the escape routes due to the loss of visibility in the smoke of an indoor fire. *Pozharovzryvbezopasnost'/ Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(3):76-87. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.76-87 (rus).

✉ Sergey Viktorovich Puzach, e-mail: puzachsv@mail.ru

Введение

Математическое моделирование термогазодинамики пожара позволяет оценить степень опасности нахождения человека в здании [1–7]. Согласно работам [8–12], в большинстве случаев снижение видимости в дыму достигает критических значений раньше других опасных факторов пожара.

Точность расчета дальности видимости существенно зависит от величины дымообразующей способности [8, 13, 14] веществ и материалов, полученной экспериментально. Дымообразующая способность, в свою очередь, зависит от химического состава и физических параметров пожарной нагрузки [11, 15], а также на данный показатель существенно влияют параметры газовой среды помещения и количество окислителя [13, 16–18].

В России при расчете времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара используется база данных типовой пожарной нагрузки [8]. Однако для большинства современных веществ и материалов такие данные отсутствуют.

Кроме того, значения коэффициента дымообразования, получаемые стандартным методом (по ГОСТ 12.1.044–89¹, п. 4.18), используемым при сертификации, существенно отличаются от значений, приведенных в базе данных [8]. Поэтому повышение качества проведения огневых испытаний по определению дымообразующей способности веществ и материалов, надежность измерительного оборудования и методов обработки полученных результатов являются актуальными и достаточно сложными научными задачами.

Вышеуказанные испытания проводятся в маломасштабных экспериментальных установках. Для использования полученных данных при расчете оптической плотности дыма в полномасштабном реальном помещении необходимо в первую очередь учитывать

¹ ГОСТ 12.1.044–89. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 12 декабря 1989 г. № 3683.

масштабный фактор. Однако научного обоснования такого подхода в литературных источниках нет.

Целью работы является разработка нового подхода к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости, учитывающего масштабный фактор и не использующего удельный коэффициент дымообразования.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ схем развития пожара в маломасштабном и полномасштабном помещениях;
- получить для этих схем теоретические зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от других среднеобъемных параметров газовой среды помещения;
- сравнить результаты расчетов по полученным зависимостям с экспериментальными данными.

Зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры и среднеобъемной парциальной плотности кислорода

Рассмотрим две схемы термогазодинамики пожара:

- горение в условно герметичном объеме (маломасштабные экспериментальные установки для получения параметров процесса горения веществ и материалов (закрытая термодинамическая система [12, 15]) или полномасштабные помещения с малой величиной проемности);
- проемы помещения работают только на выброс газа наружу (начальная стадия пожара в полномасштабном помещении или маломасштабные экспериментальные установки для получения параметров процесса горения веществ и материалов (открытая термодинамическая система [12, 15])).

В условно герметичном объеме законы сохранения энергии, оптической плотности дыма и массы кислорода соответственно имеют вид [8]:

$$V \frac{d}{dt} (\rho_m c_p T_m) = \eta \Psi Q_H^P (1 - \varphi); \quad (1)$$

$$V \frac{d\mu_m}{dt} = D_m \Psi; \quad (2)$$

$$V \frac{d\rho_{O_2m}}{dt} = -\eta \Psi L_{O_2}, \quad (3)$$

где τ — время, с;

T_m — среднеобъемная температура, К;

c_p — удельная изобарная теплоемкость газовой среды, Дж/(кг·К);

ρ_m — среднеобъемная парциальная плотность газовой среды, кг/м³;

η — полнота сгорания;

Ψ — массовая скорость выгорания горючего материала, кг/с;

Q_H^P — низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг;

φ — коэффициент теплопотерь от газовой среды объема в его стенки;

μ_m — среднеобъемная оптическая плотность дыма, Нп/м;

D_m — удельный коэффициент дымообразования горючего материала, Нп·м²/кг;

ρ_{O_2m} — среднеобъемная парциальная плотность кислорода, кг/м³;

L_{O_2} — удельный коэффициент потребления кислорода.

Совместно решая уравнения (1) и (2) и учитывая, что в герметичном объеме $\rho_m \approx \rho_a$, можно получить зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры:

$$\mu_m = K_1 (T_m - T_a), \quad (4)$$

где $K_1 = D_m \rho_a c_p / \eta Q_H^P (1 - \varphi)$ — коэффициент пропорциональности, Нп/(м·К);

ρ_a — плотность воздуха в объеме перед горением, кг/м³;

T_a — температура воздуха в объеме перед горением, К.

После совместного решения уравнений (2) и (3) получаем зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной парциальной плотности кислорода:

$$\mu_m = K_2 (\rho_{O_2a} - \rho_{O_2m}), \quad (5)$$

где $K_2 = D_m / \eta L_{O_2}$ — коэффициент пропорциональности, Нп·м²/кг;

ρ_{O_2a} — среднеобъемная парциальная плотность кислорода в воздухе, кг/м³.

Из уравнений (4) и (5) видно, что величина среднеобъемной оптической плотности дыма прямо пропорциональна изменениям среднеобъемной температуры и среднеобъемной парциальной плотности кислорода, а также она не зависит от размеров помещения. Поэтому зависимости (4) и (5) могут использоваться при расчете как в маломасштабном, так и в полномасштабном помещении.

В случае аналитического решения интегральной модели, когда проемы работают только на выброс газовой среды помещения наружу, аналитические решения на основе законов сохранения энергии для оптической плотности дыма и массы кислорода соответственно имеют вид [8]:

$$\frac{T_m}{T_a} = \exp\left(\frac{A}{B} \tau^n\right); \quad (6)$$

$$\mu_m = \mu_* \left[1 - \exp\left(-\frac{A}{B} \tau^n\right) \right]; \quad (7)$$

$$\rho_{O_2,m} = \frac{B\eta L_{O_2}}{V} \left\{ \left(1 + \frac{V}{B\eta L_{O_2}} \rho_{O_2,a} \right) \exp \left[-\frac{A}{B} \tau^n \right] - 1 \right\}, (8)$$

где $\mu_* = c_p \rho_a T_a D_m / \eta (1 - \varphi) Q_H^P$ — характерная оптическая плотность, Нп/м;

$B = c_p \rho_a T_a V / \eta Q_H^P (1 - \varphi)$ — размерный комплекс, кг;

n — показатель степени, зависящий от вида горючего материала (твердый или жидкий) и характера процесса выгорания;

A — размерный комплекс, зависящий от вида горючего материала (твердый или жидкий) и характера процесса выгорания, кг/сⁿ.

Совместно решая уравнения (6) и (7), можно получить зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от относительного изменения среднеобъемной температуры:

$$\mu_m = K_3 \left[\frac{T_m - T_a}{T_m} \right], (9)$$

где $K_3 = \mu_* = c_p \rho_a T_a D_m / \eta (1 - \varphi) Q_H^P$ — коэффициент пропорциональности, Нп/м;

ρ_a — плотность воздуха в объеме перед горением, кг/м³;

T_a — температура воздуха в объеме перед горением, К.

В результате совместного решения уравнений (7) и (8) можно получить зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной парциальной плотности кислорода:

$$\mu_m = K_4 (\rho_{O_2,a} - \rho_{O_2,m}), (10)$$

где $K_4 = \mu_* / B\eta L_{O_2} / V + \rho_{O_2,a}$ — коэффициент пропорциональности, Нп·м²/кг.

Из уравнений (9) и (10) видно, что величина среднеобъемной оптической плотности дыма прямо пропорциональна относительному изменению среднеобъемной температуры и изменению среднеобъемной парциальной плотности кислорода. Поэтому зависимости (9) и (10) могут использоваться при расчете как в маломасштабном, так и в полномасштабном помещении.

Таким образом, в рассматриваемых схемах термогазодинамики пожара величину среднеобъемной оптической плотности дыма можно рассчитывать, не решая уравнение закона ее сохранения.

Для экспериментальной проверки прямой пропорциональности величины среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры и среднеобъемной парциальной плотности кислорода были проведены экспериментальные исследования на маломасштабной установке [12, 15].

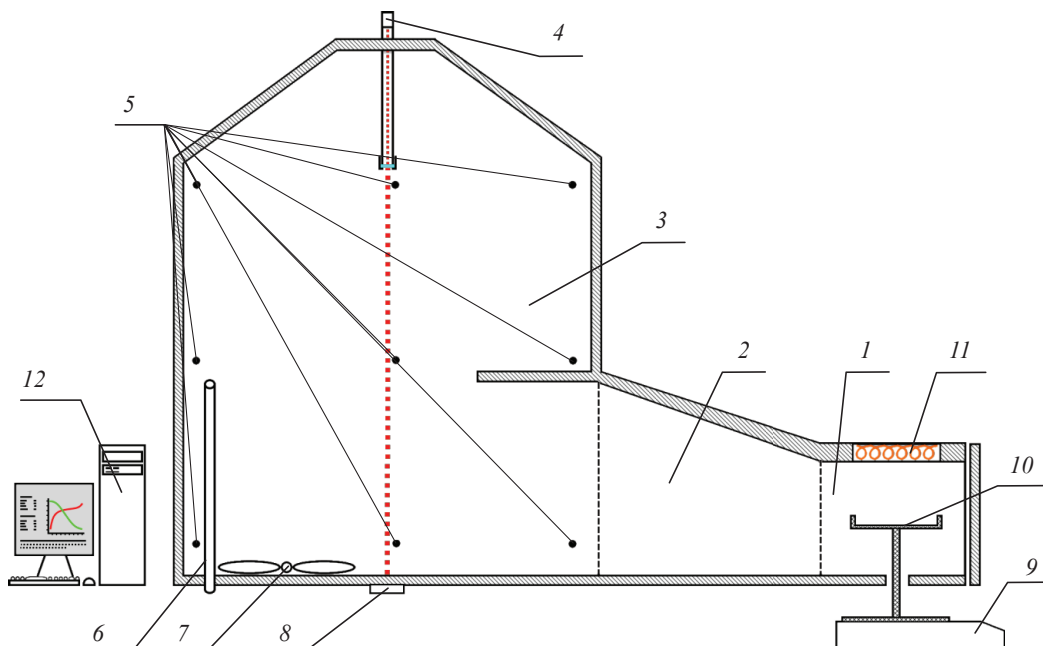


Рис. 1. Схема модифицированной экспериментальной установки [12, 15]: 1 — камера сгорания; 2 — переходной рукав; 3 — экспозиционная камера; 4 — лазерный модуль; 5 — термопары; 6 — зонд отбора газа; 7 — вентилятор; 8 — фоточувствительный элемент; 9 — электронные весы; 10 — держатель образца; 11 — электронагревательный излучатель; 12 — регистрирующая аппаратура

Fig. 1. The diagram of a modified experimental facility [12, 15]: 1 — combustion chamber; 2 — adapter hose; 3 — exposure chamber; 4 — laser module; 5 — thermocouples; 6 — a gas extraction probe; 7 — fan; 8 — photosensitive element; 9 — electronic scales; 10 — sample holder; 11 — electric heating emitter; 12 — recording equipment

Описание экспериментальной установки и исходных данных при проведении огневых испытаний

Коэффициент дымообразования строительных и отделочных материалов определяется с использованием стандартного метода (по ГОСТ 12.1.044–89, п. 4.18). Однако данный метод имеет ряд существенных недостатков [15]. Поэтому в целях определения коэффициента дымообразования, необходимого для расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на объектах энергетики, используем модифицированную экспериментальную установку [12, 15], схема которой представлена на рис. 1.

Согласно работам [17, 19], в зависимости от размеров помещения и типа горючего материала при проведении огневых испытаний могут создаваться различные по величине тепловые потоки. Также считается, что при среднем пожаре величина теплового потока, падающего на образец, составляет 35 кВт/м² [17, 19]. Используемая установка позволяет проводить огневые испытания при различной плотности падающего на образец теплового потока.

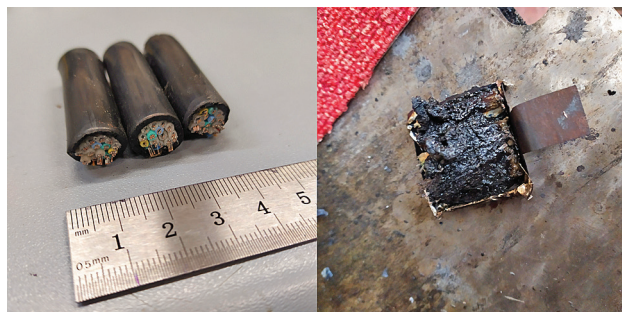


Рис. 2. Образцы кабеля ВВГнг для проведения огневых испытаний с площадью обогрева $S_0 = 16 \text{ см}^2$

Fig. 2. Samples of the PVC insulated and sheathed bare (coverless) cable used in the fire tests with a heating area of $S_h = 16 \text{ см}^2$



Рис. 3. Образцы кабеля ВВГнг для проведения огневых испытаний с площадью обогрева $S_0 = 1 \text{ см}^2$

Fig. 3. Samples of the PVC insulated & sheathed bare (coverless) cable used in the fire tests with a heating area of $S_h = 1 \text{ см}^2$

Определение величины оптической плотности дыма аналогично стандартному методу основано на законе Бугера – Ламберта – Бера [20] и выполняется по формуле:

$$\mu_m = \frac{1}{L} \ln \frac{I_0}{I_{\min}}, \quad (11)$$

где L — длина пути луча света в задымленной среде, м;

I_0, I_{\min} — соответственно, значения начального и конечного светопропускания, %.

Коэффициент дымообразования определялся по следующему выражению (ГОСТ 12.1.044–89, п. 4.18):

$$D_m = \frac{V}{Lm} \ln \frac{I_0}{I_{\min}}, \quad (12)$$

где V — объем экспозиционной камеры, м³;

m — масса образца, кг.

В качестве образцов для огневых испытаний был выбран кабель ВВГнг. Данный выбор был обоснован тем, что одной из основных пожарных нагрузок на объектах энергетики является кабельная продукция, а в базе данных типовой пожарной нагрузки [8] представлены только шесть видов кабелей. Величины удельных коэффициентов дымообразования этих кабелей варьируются от 407 до 850 Нп·м²/кг, что составляет достаточно большой разброс.

Испытания для определения дымообразующей способности сначала проводились на образцах стандартного размера ($4 \times 4 \text{ см}^2$) вместе с токопроводящей частью, как показано на рис. 2. Однако такое количество горючего материала по отношению к объему экспозиционной камеры оказалось избыточным, так как фотометрическая система должна обеспечивать измерение светового потока в рабочем диапазоне светопропускания от 2 до 90 % (по ГОСТ 12.1.044–89, п. 4.18), но в данных условиях светопропускание достигало 0 % практически сразу после начала огневого испытания.

Поэтому было принято решение уменьшить размер образца (рис. 3) до величины, при которой значение минимального светопропускания попадало в рабочий диапазон (по ГОСТ 12.1.044–89, п. 4.18). Однако данный размер образца (площадь поверхности $S_0 = 1 \text{ см}^2$) привел к тому, что за время достижения светопропусканием 0 % среднеобъемная парциальная плотность кислорода практически не изменялась. Поэтому на данной установке, работающей по условно герметичной схеме, проверить экспериментально зависимость оптической плотности дыма от концентрации кислорода не представляется возможным. Однако при работе установки по проточной схеме [21] в дальнейшем такие эксперименты будут выполнены.

Образцы с уменьшенной площадью обогрева были испытаны при различной плотности падающего теплового потока, а именно при 20, 25, 35, 50 и 65 кВт/м².

Также огневые испытания данного материала проводились на стандартной установке (по ГОСТ 12.1.044–89, п. 4.18) для сравнения коэффициента дымообразования. Размеры образцов для проведения испытаний на обеих установках были идентичны.

Обработка и анализ результатов огневых испытаний

Обработка данных огневых испытаний осуществлялась при помощи программы MS Excel.

Значения удельного коэффициента дымообразования при различном тепловом воздействии, полученные на данной экспериментальной установке, представлены в таблице.

Из таблицы видно, что величина удельного коэффициента дымообразования существенно зависит от плотности падающего на образец теплового потока, т.е. от режима горения в камере сгорания экс-

Значения дымообразующей способности

Smoke generation ability values

Показатель Indicator	Значения Values				
Плотность падающего теплового потока, кВт/м ² Incident heat flux density, kW/m ²	20	25	35	50	65
Коэффициент дымообразования, Нп·м ² /кг Smoke generation coefficient, Np·m ² /kg	412	634	632	628	587

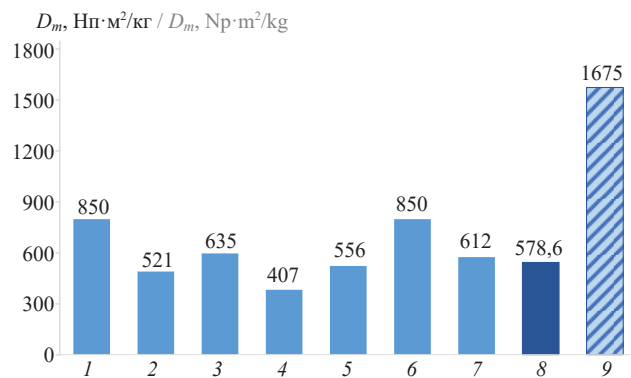


Рис. 4. Гистограмма значений дымообразующей способности из базы данных типовой пожарной нагрузки [4] и усредненных значений, полученных на новой экспериментальной установке [3, 11] и установке по ГОСТ 12.1.044–89 п. 4.18: 1 — резинотехнические изделия (резина и изделия из нее) [4]; 2 — кабельный подвал/лоток кабеля АВВГ + АПВГ [4]; 3 — электрокабель АВВГ ПВХ оболочка + изоляция [4]; 4 — электрокабель АПВГ ПВХ оболочка + полиэтилен [4]; 5 — телефонный кабель ТПВ ПВХ + полиэтилен [4]; 6 — провода в резиновой изоляции типа КПРТ, ПТ, ВПРС [4]; 7 — кабель + провода 0,75(АВВГ, АПВГ, ТПВ) + 0,25 (КПРТ, ПР, ШРПС) [4]; 8 — кабель ВВГнг (экспериментальная установка) [3, 11]; 9 — кабель ВВГнг (стандартная установка ГОСТ 12.1.044–89 п. 4.18)

Fig. 4. A histogram of the smoke generation ability, extracted from the database of standard fire loads [4] and averaged values obtained in the new experimental unit [3, 11] and the unit made according to GOST 12.1.044-89 p. 4.18: 1 — Rubber products: rubber, rubber products [4]; 2 — Cable basement / tray, AVVG + APVG cables [4]; 3 — Electric cable AVVG PVC shell + insulation [4]; 4 — Electric cable APVG PVC shell + polyethylene [4]; 5 — Telephone cable TPV PVC + polyethylene [4]; 6 — Wires having rubber insulation such as KPRT, PT, VPRS [4]; 7 — Cable + wires 0.75 (AVVG, APVG, TPV) + 0.25 (KPRT, PR, SRPS) [4]; 8 — PVC insulated & sheathed bare (coverless) reduced fire hazard rating cable (an experimental unit) [3, 11]; 9 — PVC insulated & sheathed bare (coverless) cable (GOST 12.1.044-89 p. 4.18)

периментальной установки. Поэтому использование вышеуказанной величины при решении уравнений закона сохранения оптической плотности дыма (2) и (7) требует дополнительного обоснования ее выбора при расчете пожара в полномасштабном помещении.

Из таблицы видно, что среднее значение коэффициента дымообразования для кабеля ВВГнг равно 578,6 Нп·м²/кг. Это значение существенно отличается от величины 1675 Нп·м²/кг, полученной на стандартной установке по ГОСТ 12.1.044–89.

Сравнение полученной величины удельного коэффициента дымообразования со значениями в базе данных [8] представлено на рис. 4, из которого видно, что использование стандартной установки по ГОСТ 12.1.044–89 приводит к существенно завышенным значениям вышеуказанного коэффициента.

Экспериментальные зависимости от времени проведения экспериментов удельного коэффициента

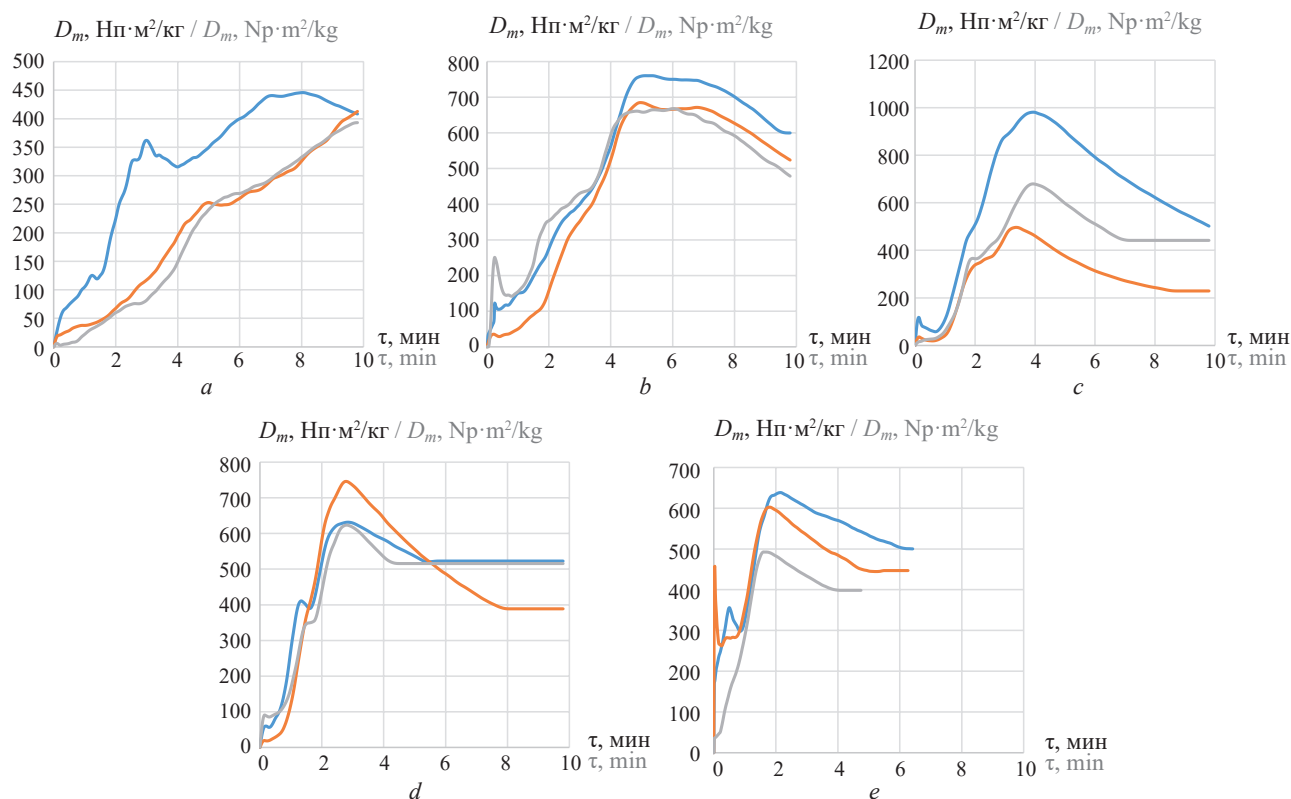


Рис. 5. Зависимости удельного коэффициента дымообразования от времени проведения экспериментов при плотности теплового потока: *a* — 20 кВт/м²; *b* — 25 кВт/м²; *c* — 35 кВт/м²; *d* — 50 кВт/м²; *e* — 65 кВт/м²

Fig. 5. Dependences between the specific smoke generation coefficient and the time of experiments at the heat flux density: *a* — 20 kW/m², *b* — 25 kW/m², *c* — 35 kW/m²; *d* — 50 kW/m²; *e* — 65 kW/m²

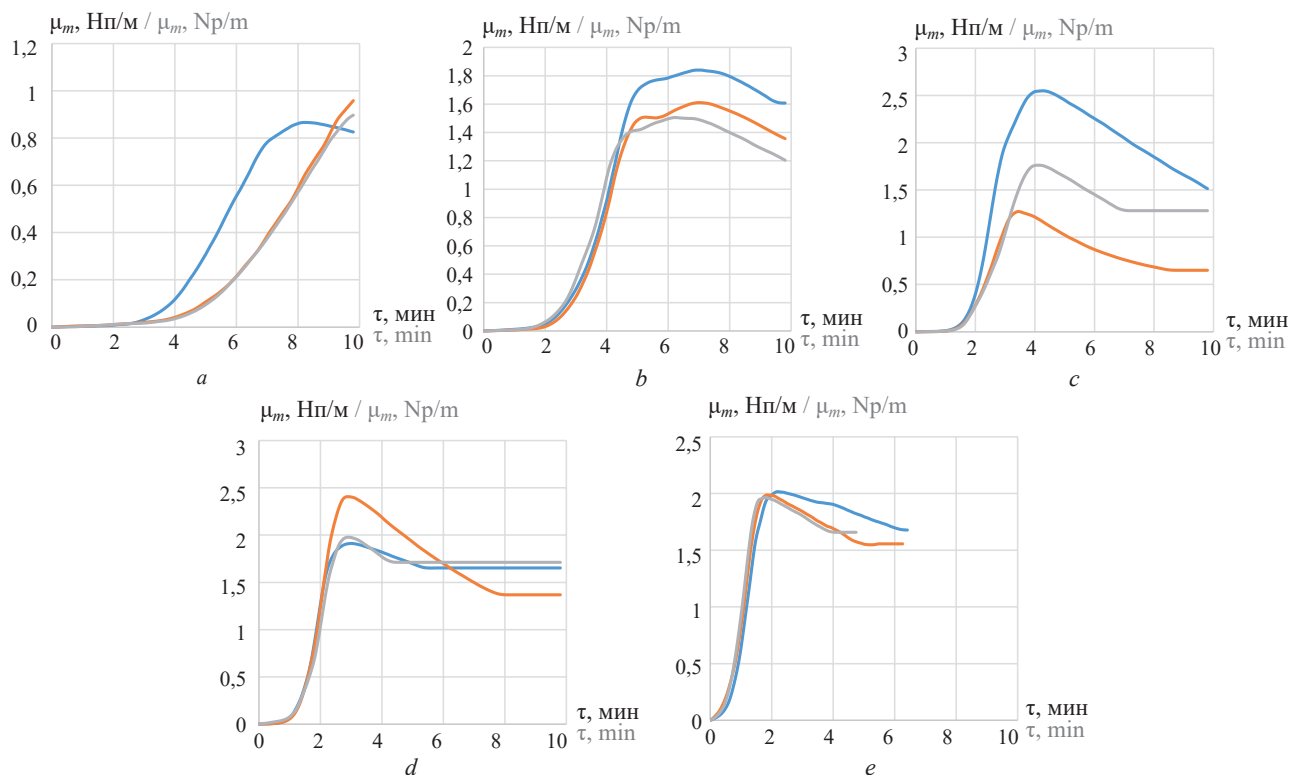


Рис. 6. Зависимости оптической плотности дыма от времени проведения экспериментов при плотности теплового потока: *a* — 20 кВт/м²; *b* — 25 кВт/м²; *c* — 35 кВт/м²; *d* — 50 кВт/м²; *e* — 65 кВт/м²

Fig. 6. Dependences between the optical density of smoke and the time of experiments at the heat flux density: *a* — 20 kW/m², *b* — 25 kW/m², *c* — 35 kW/m²; *d* — 50 kW/m²; *e* — 65 kW/m²

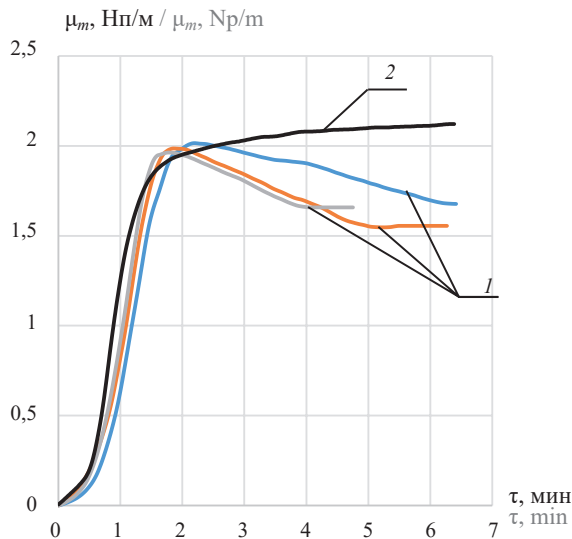


Рис. 7. Зависимости оптической плотности дыма от времени проведения экспериментов при плотности теплового потока 65 кВт/м^2 : 1 — эксперимент; 2 — расчет (уравнение (2))

Fig. 7. Dependences between the optical density of smoke and the time of experiments at a heat flux density of 65 kW/m^2 : 1 — experiment; 2 — calculation (equation (2))

дымообразования показаны на рис. 5, от оптической плотности дыма — на рис. 6.

Для оценки адекватности использования уравнения (2) интегральной модели на рис. 7 показаны результаты сопоставления расчетных величин среднеобъемной оптической плотности дыма с их экспериментальными значениями при плотности теплового потока 65 кВт/м^2 . При этом в качестве исходных данных к уравнению (2) использовались экспериментальные значения удельного коэффициента дымообразования и массовой скорости выгорания горючего материала.

Из рис. 7 видно, что совпадение расчета с экспериментом — удовлетворительное для инженерного метода расчета. Существенное расхождение после прохождения 100 с с начала процесса объясняется тем, что в этот момент времени были открытышиберные отверстия в экспозиционной камере для удаления дыма, и процесс горения перестал проходить в герметичном объеме.

Экспериментальные и теоретические (выражение (4)) зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной тем-

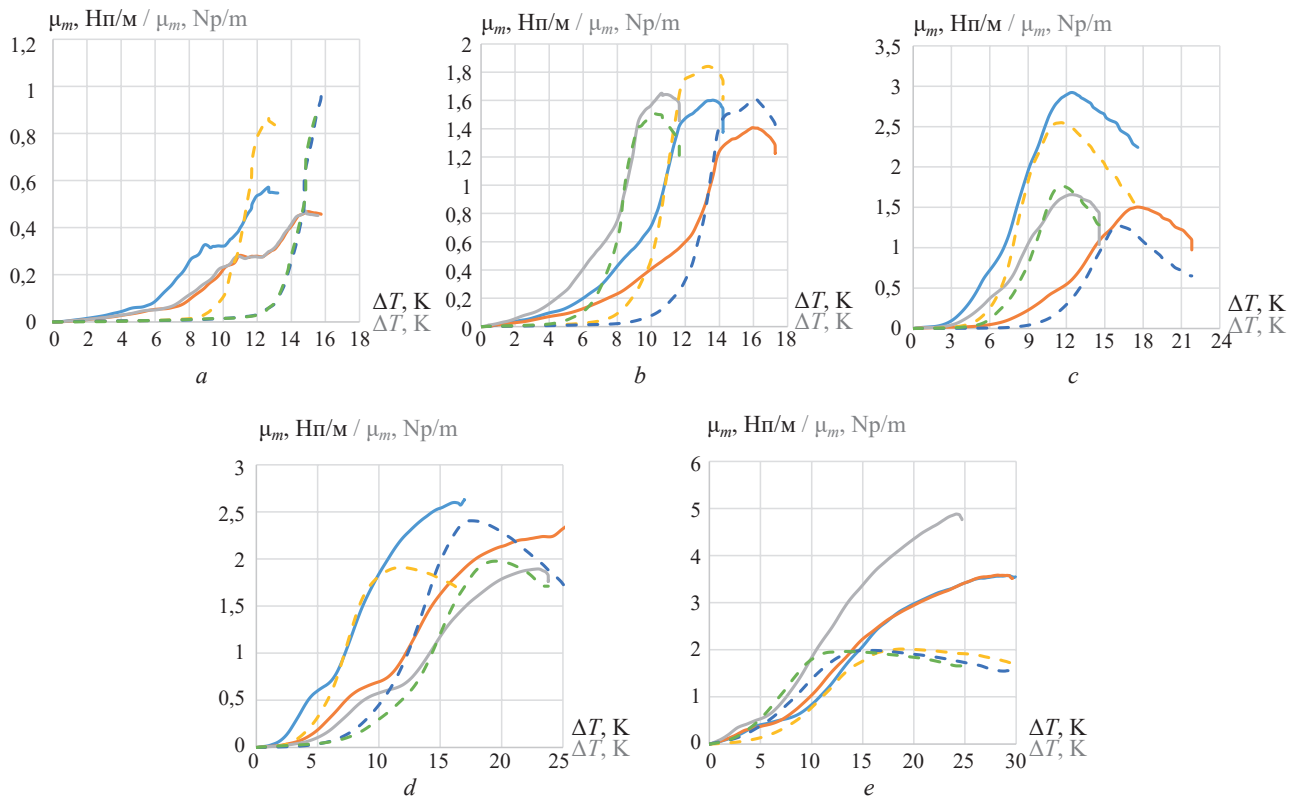


Рис. 8. Зависимости оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры при плотности теплового потока: а — 20 кВт/м^2 ; б — 25 кВт/м^2 ; в — 35 кВт/м^2 ; д — 50 кВт/м^2 ; е — 65 кВт/м^2 ; штриховая линия — эксперимент; сплошная линия — расчет с использованием выражения (4)

Fig. 8. Dependences between the optical density of smoke and changes in the volumetric average temperature at the heat flux density: а — 20 kW/m^2 ; б — 25 kW/m^2 ; в — 35 kW/m^2 ; д — 50 kW/m^2 ; е — 65 kW/m^2 ; dashed line — the experiment; solid line — the calculation performed using expression (4)

пературы при различных плотностях теплового потока представлены на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что расчетные зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры качественно соответствуют экспериментальным зависимостям.

Отличия в количественных значениях отражают то, что коэффициент теплопотерь в формуле (4) не измеряется на данной установке, а принят равным его среднему экспериментальному значению для данной установки, полученному в работе [22].

Таким образом, расчет времени блокирования путей эвакуации по потере видимости при пожаре в полномасштабном помещении без использования уравнений закона сохранения оптической плотности дыма (2) и (7) можно проводить следующим образом:

- нахождение зависимостей от времени среднеобъемной температуры или среднеобъемной парциальной плотности кислорода;
- определение величины среднеобъемной оптической плотности дыма по величине среднеобъемной температуры или среднеобъемной

парциальной плотности кислорода в каждый момент времени;

- расчет по существующей методике [8] величины оптической плотности дыма на высоте рабочей зоны путей эвакуации в каждый момент времени, по которой по известной формуле [8] определяется дальность видимости.

Выводы

В предложенном экспериментально-теоретическом подходе к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости при пожаре в полномасштабном помещении предлагается использовать экспериментальные зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры или среднеобъемной парциальной плотности кислорода, полученные в маломасштабной экспериментальной установке.

При этом отпадает необходимость решения дифференциального уравнения закона сохранения оптической плотности дыма, в которое входит удельная дымообразующая способность, существенно зависящая от условий проведения эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александренко М.В., Акулова М.В., Ибрагимов А.М.* Математическое моделирование пожара // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 4–1 (35). С. 28–29. URL: <https://research-journal.org/technical/matematicheskoe-modelirovanie-pozhara>.
2. *Ярош А.С., Чалаташвили М.Н., Кроль А.Н., Попова Е.А., Романова В.В., Сачков А.В.* Анализ математических моделей развития опасных факторов пожара в системе зданий и сооружений // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности/ Industrial safety. 2019. № 1. С. 50–56.
3. *Dennai B., El M., Khelfaoul R.* Numerical investigation of flow dynamic in mini-channel: case of a mini diode Tesla // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2016. Vol. 12 (3). Pp. 102–110. DOI: 10.3970/fdmp.2016.012.102
4. *Du J., Wu X., Li R., Cheng R.* Numerical simulation and optimization of a mid-temperature heat pipe exchanger // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2019. Vol. 15 (1). Pp. 77–87. DOI: 10.32604/fdmp.2019.05949
5. *Ihdene M., Malek T.B., Aberkane S., Mouderes M., Spiterri P., Abderrahmane G.* Analytical and numerical study of the evaporation on mixed convection in a vertical rectangular cavity // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2017. Vol. 13 (2). Pp. 85–105.
6. *Ja A., Cheddadi A.* Numerical simulation of thermosolutal convective transitions in a very narrow porous annulus under the influence of Lewis Number // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2017. Vol. 13 (4). Pp. 235–249. DOI: 10.3970/fdmp.2017.013.235
7. *Triveni M.K., Panua R.* Numerical study of natural convection in a right triangular enclosure with sinusoidal hot wall and different configurations of cold walls // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2018. Vol. 14 (1). Pp. 1–21. DOI: 10.3970/fdmp.2018.014.001
8. *Кошмаров Ю.А.* Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учебное пособие. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
9. *Колодяжный С.А., Переславцева И.И.* Математическое моделирование динамики основных опасных факторов в начальной стадии пожара // Известия Казанского государственного

- ного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (30). С. 403–412. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23419307>
10. Husted B.P., Carlsson J., Goransson U. Visibility through inhomogeneous smoke using CFD proceedings of interflam. Edinburgh, 2004. Pp. 697–702.
 11. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / пер. с англ. М. : Стройиздат, 1990. 424 с.
 12. Мустафин В.М., Пузач С.В. Влияние начальной освещенности и дымообразующей способности на расчетное время блокирования путей эвакуации по потере видимости // Безопасность жизнедеятельности. 2020. № 2. С. 17–22.
 13. Orzel R.A. Toxicological aspects of firesmoke: polymer pyrolysis and combustion // Occupational Medicine. 1993. Vol. 8 (3). Pp. 414–429.
 14. Пузач С.В., Смагин А.В., Лебедченко О.С., Абакумов Е.С. Новые представления о расчете необходимого времени эвакуации людей и об эффективности использования портативных фильтрующих самоспасателей при эвакуации на пожарах. М. : Академия ГПС МЧС России, 2007. 222 с.
 15. Мустафин В.М., Пузач С.В., Акперов Р.Г. Влияние условий проведения испытаний в камере сгорания мелкомасштабной экспериментальной установки на дымообразующую способность древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 1. С. 23–31. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.23-31
 16. Rasbash D.J., Drysdale D.D. Fundamentals of smoke production // Fire Safety Journal. 1982. Vol. 5. Issue 1. Pp. 77–86.
 17. Барботько С.Л., Вольный О.С. Оценка тепловыделения при горении электрических кабелей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 11. С. 35–44. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.35-44
 18. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.
 19. Mouritz A.P., Gibson A.G. Fire properties of polymer composite materials. Dordrecht, Netherlands : Springer, 2006. 398 p.
 20. Widmann J.F. Evaluation of the planck mean absorption coefficients for radiation transport through smoke // Combustion Science and Technology. 2003. Vol. 175. Pp. 2299–2308. DOI: 10.1080/714923279
 21. Пузач С.В., Сулейкин Е.В. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 2. С. 13–20. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20
 22. Пузач С.В., Акперов Р.Г. Экспериментальное определение удельного коэффициента образования монооксида углерода при пожаре в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 5. С. 18–25. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.18-25

REFERENCES

1. Aleksandrenko M.V., Akulova M.V., Ibragimov A.M. Mathematical modelling of the fire. *Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal /International research journal*. 2015; 4-1(35):28-29. URL: <https://research-journal.org/technical/matematicheskoe-modelirovanie-pozhara/> (rus).
2. Yarosh A.S., Chalatashvili M.N., Krol A.N., Popova E.A., Romanova V.V., Sachkov A.V. The system of buildings and structures dangerous fire factors development mathematical models alysis. *Bulletin of research center for safety in coal industry/Industrial safety*. 2019; 1:50-56. (rus).
3. Dennai B., El M., Khelfaoul R. Numerical investigation of flow dynamic in mini-channel: case of a mini diode Tesla. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2016; 12(3):102-110. DOI: 10.3970/fdmp.2016.012.102
4. Du J., Wu X., Li R., Cheng R. Numerical simulation and optimization of a mid-temperature heat pipe exchanger. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2019; 15(1):77-87. DOI: 10.32604/fdmp.2019.05949
5. Ihdene M., Malek T.B., Aberkane S., Mouderes M., Spiterri P., Abderrahmane G. Analytical and numerical study of the evaporation on mixed convection in a vertical rectangular cavity. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2017; 13(2):85-105. DOI: 10.3970/fdmp.2017.013.235

6. Ja A., Cheddadi A. Numerical simulation of thermosolutal convective transitions in a very narrow porous annulus under the influence of Lewis Number. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2017; 13(4):235-249. DOI: 10.3970/fdmp.2017.013.235
7. Triveni M.K., Panua R. Numerical study of natural convection in a right triangular enclosure with sinusoidal hot wall and different configurations of cold walls. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2018; 14(1):1-21. DOI: 10.3970/fdmp.2018.014.001
8. Koshmarov Yu.A. *Forecasting of fire hazards in the case of indoor fire*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2000; 118. (rus).
9. Kolodyazhny S.A., Pereslavytseva I.I. Mathematical modeling of the dynamics of the main hazards in the initial stage of fire. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2014; 4(30):403-412. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23419307> (rus).
10. Husted B.P., Carlsson J., Goransson U. *Visibility through Inhomogeneous smoke using CFD Proceedings of Interflam*. Edinburgh, 2004; 697-702.
11. Draydel D.D. *An introduction to fire dynamics*. Chichester, John Wiley and Sons, 1985.
12. Mustafin V.M., Puzach S.V. The effect of primary illumination and smoke-forming ability on the estimated time of blocking escape routes because of poor visibility. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti/Life Safety*. 2020; 2:17-22. (rus).
13. Orzel R.A. Toxicological aspects of firesmoke: polymer pyrolysis and combustion. *Occupational Medicine*. 1993; 8(3):414-429.
14. Puzach S.V., Smagin A.V., Lebedchenko O.S., Abakumov E.S. *New ideas about the calculation of necessary time of evacuation of people and the effectiveness of using a portable filter self-rescuers during evacuation at fires*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2007; 222. (rus).
15. Mustafin V.M., Puzach S.V., Akperov R.G. Influence of conditions in the combustion chamber of small-scale installation on smoke generating ability of wood. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):23-31. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.23-31 (rus).
16. Rasbash D.J., Drysdale D.D. Fundamentals of smoke production. *Fire Safety Journal*. 1982; 5(1):77-86.
17. Barbotko S.L., Volnyy O.S. Heat release assessment at burning electric cables. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(11):35-44. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.35-44 (rus).
18. Puzach S.V. *Methods for calculating the heat and mass exchange in a fire in the room and their application in solving practical tasks of fire and explosion protection*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2005; 336. (rus).
19. Mouritz A.P., Gibson A.G. *Fire properties of polymer composite materials*. Dordrecht, Netherlands, Springer, 2006; 398. (rus).
20. Widmann J.F. Evaluation of the planck mean absorption coefficients for radiation transport through smoke. *Combustion Science and Technology*. 2003; 175:2299-2308. DOI: 10.1080/714923279 (rus).
21. Puzach S.V., Suleykin E.V. New united theoretical and experimental approach to the calculation of the distribution of toxic gases in case of fire in the room. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(2):13-20. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20 (rus).
22. Puzach S.V., Akperov R.G. Experimental determination of the specific coefficient of release of carbon monoxide during a fire in the room. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(5):18-25. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.18-25 (rus).

Поступила 30.01.2021, после доработки 15.02.2021;
принята к публикации 02.03.2021

Received January 30, 2021; Received in revised form February 15, 2021;
Accepted March 2, 2021

Информация об авторах

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,

Information about the authors

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; Re-

г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 18265; Scopus Author ID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: pzachsv@mail.ru

МУСТАФИН Валихан Мухтарович, адъюнкт, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация; преподаватель кафедры оперативно-тактических дисциплин, Академия гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан, г. Кокшетау, Республика Казахстан; ORCID: 0000-0001-8391-7241; e-mail: GeneralPK@bk.ru

АКПЕРОВ Руслан Гянджавиевич, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация; РИНЦ ID: 766879; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

searcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: pzachsv@mail.ru

Valikhan M. MUSTAFIN, Postgraduate Student, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation; Lecturer of Operational and Tactical Disciplines Department, Academy of Civil Protection. M. Gabdullina Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan, Kokshetau, Republic of Kazakhstan; ORCID: 0000-0001-8391-7241; e-mail: GeneralPK@bk.ru

Ruslan G. AKPEROV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of Fire Safety in Building 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: 766879; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru