

Оценка времени блокирования путей эвакуации по объемной счетной концентрации твердых частиц дыма, образующегося при горении твердых горючих материалов в помещении

Сергей Викторович Пузач¹✉, Юрий Юрьевич Журавлев²

¹ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

² Департамент надзорной деятельности и профилактической работы МЧС России, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В качестве опасного фактора пожара в научной и нормативной литературе учитывается только одно опасное свойство дыма — снижение видимости. Поэтому оценка времени блокирования путей эвакуации по объемной счетной концентрации твердых частиц дыма является актуальной научной задачей.

Цели и задачи. Целью работы является экспериментально-теоретическая оценка времени блокирования путей эвакуации во время пожара в помещении по объемной концентрации твердых частиц дыма. Для достижения поставленной цели необходимо провести экспериментальное исследование дымообразующей способности горючих материалов по количеству частиц дыма и получить формулу для расчета времени блокирования путей эвакуации по объемной счетной концентрации твердых частиц дыма.

Методы. Экспериментальный метод измерения количества, размеров и массы взвешенных твердых частиц в газовой среде, образующейся в маломасштабной опытной установке при горении различных веществ и материалов. Аналитический метод расчета времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара.

Результаты и их обсуждение. Предложена формула для расчета времени блокирования путей эвакуации по объемной концентрации твердых частиц дыма.

Получены экспериментальные зависимости от времени удельной массовой скорости газификации и удельные коэффициенты дымообразования по объемной счетной концентрации твердых частиц дыма с эквивалентным диаметром, меньшим 2,5 мкм, при испытаниях образцов древесины, изоляции кабелей и элементов микроэлектроники.

Представлены результаты численных экспериментов по расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму и по объемной счетной концентрации твердых частиц дыма.

Обнаружено, что объемная концентрация частиц дыма может быть первым опасным фактором пожара, блокирующим пути эвакуации.

Выводы. Наиболее опасные по воздействию на организм человека во время его эвакуации при пожаре мелкодисперсные твердые частицы дыма с эквивалентным диаметром, меньшим 2,5 мкм, могут быть опасным фактором пожара, первым блокирующим пути эвакуации.

Ключевые слова: пожар; сажа; древесина; изоляция кабеля; микроэлектроника; эвакуация; токсикология

Для цитирования: Пузач С.В., Журавлев Ю.Ю. Оценка времени блокирования путей эвакуации по объемной счетной концентрации твердых частиц дыма, образующегося при горении твердых горючих материалов в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 2. С. 50–59. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.50-59

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

Estimation of the blocking time of evacuation routes based on the volume counting concentration of solid smoke particles produced by burning solid combustible materials in a room

Sergey V. Puzach¹✉, Yuri Yu. Zhuravlev²

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

² Fire Safety Department of Supervision and Fire Prevention of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. As a fire hazard in the scientific and regulatory literature, only one hazardous property of smoke is taken into account – reduced visibility. Therefore, estimating the blocking time of escape routes by the volumetric counting concentration of solid smoke particles is an urgent scientific task.

Aims and objectives. The aim of the work is experimental and theoretical estimation of the blocking time of evacuation routes during a fire in a room by the volume concentration of solid smoke particles. To achieve this goal, it is necessary to conduct an experimental study of the smoke-forming ability of combustible materials by the number of smoke particles and obtain a formula for calculating the time for blocking escape routes by the volumetric counting concentration of solid smoke particles.

Methods. An experimental method of measuring the amount, size and mass of suspended solids in a gaseous medium forming in a small-scale pilot plant during combustion of various substances and materials. Analytical method for calculation of evacuation route blocking time by fire hazards is used.

Results and discussion. Formula for calculation of evacuation route blocking time by volume concentration of solid smoke particles is proposed.

Experimental time dependences of the specific mass rate of gasification and specific smoke formation coefficients based on the volumetric count concentration of solid smoke particles with an equivalent diameter less than $2.5 \mu\text{m}$ were obtained during testing of specimens of wood, cable insulation, and microelectronic elements.

The results of numerical experiments on calculation of time of blocking evacuation routes due to loss of visibility in smoke and the volumetric count concentration of solid smoke particles are presented.

It was found that the volumetric concentration of smoke particles can be the first fire hazard blocking escape routes.

Conclusions. Solid smoke particles with an equivalent diameter less than $2.5 \mu\text{m}$, which are the most dangerous to the human body during evacuation in case of fire, can be a fire hazard that first blocks the escape routes.

Keywords: fire; soot; wood; cable insulation; microelectronics; evacuation; toxicology

For citation: Puzach S.V., Zhuravlev Yu.Yu. Estimation of the blocking time of evacuation routes based on the volume counting concentration of solid smoke particles produced by burning solid combustible materials in a room. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(2):50-59. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.50-59 (rus).

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

Введение

Токсичность и оптические свойства газовой среды помещения при пожаре существенно зависят от размеров и концентрации мелкодисперсных частиц дыма, состоящих из сажи и твердых окислов [1–4]. При этом особое внимание уделяется вопросу расчета потери видимости в дыму как опасному фактору пожару, наиболее часто первым блокирующем пути эвакуации [5, 6].

Вышеуказанные частицы адсорбируют токсичные соединения [2, 3, 7, 8], и их попадание в дыхательные пути человека даже при кратковременном воздействии может вызвать отравление организма человека и существенное увеличение времени его эвакуации [9–12]. При этом наиболее опасными являются взвешенные частицы с эквивалентным диаметром $d \leq 2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) [13–15], что подтверждено медицинскими исследованиями [16, 17].

Из-за сложности измерения параметров процесса образования частиц дыма в настоящее время нет данных по дымообразующей способности горючих веществ и материалов по количеству частиц дыма. Поэтому в качестве опасного фактора пожара учитывается только одно опасное свойство дыма — снижение видимости [1].

Поэтому определение оценки времени блокирования путей эвакуации по объемной счетной кон-

центрации твердых частиц дыма с эквивалентным диаметром $d \leq 2,5 \mu\text{m}$ является актуальной научной задачей.

В работе [18] выполнена экспериментальная оценка объемной массовой и счетной концентрации, а также размеров твердых частиц дыма, образующихся при горении образцов древесины, изоляции кабелей и элементов микроэлектроники. Результаты вышеуказанной работы после проведения дополнительных испытаний могут быть использованы для определения дымообразующей способности рассматриваемых материалов по количеству частиц дыма.

Целью работы является экспериментально-теоретическая оценка времени блокирования путей эвакуации во время пожара в помещении по объемной концентрации твердых частиц дыма с эквивалентным диаметром $d \leq 2,5 \mu\text{m}$, образующихся при горении горючих материалов.

- Для достижения поставленной цели необходимо:
- провести экспериментальное исследование дымообразующей способности горючих материалов по количеству частиц дыма на примере образцов древесины, изоляции кабелей и элементов микроэлектроники;
 - получить формулу для расчета времени блокирования путей эвакуации по объемной счетной концентрации твердых частиц дыма.

Математическая модель расчета времени блокирования путей эвакуации по объемной счетной концентрации твердых частиц дыма

Уравнение закона сохранения количества твердых частиц дыма в помещении без учета коагуляции (слияния) частиц, седиментации частиц дыма на поверхностях ограждающих конструкций и в отсутствие работы системы дымоудаления имеет вид [1]:

$$K_{\text{инр}} = \frac{\Delta T}{\Delta t}, \quad (1)$$

где V — объем помещения, м^3 ;

τ — время от начала пожара, с;

$N_{\text{чм}}$ — среднеобъемная концентрация частиц дыма в помещении, $1/\text{м}^3$;

D_q — дымообразующая способность горючего материала по количеству частиц дыма, $1/\text{кг}$;

Ψ — массовый расход продуктов газификации горючего материала, $\text{кг}/\text{с}$;

G_m — массовый расход газовой смеси, выходящей через открытые проемы помещения наружу, $\text{кг}/\text{с}$;

ρ_m — среднеобъемная плотность газовой среды помещения, $\text{кг}/\text{м}^3$.

На начальной стадии пожара, когда через открытые проемы помещения выходит наружу только газовая смесь помещения и нет притока внутрь наружного воздуха, массовый расход газовой смеси, выходящей через открытые проемы помещения наружу, равен [1]:

$$G_m = \frac{\Psi Q_h^p \eta (1 - \phi)}{c_p T_m}, \quad (2)$$

где Q_h^p — низшая рабочая теплота сгорания, $\text{Дж}/\text{кг}$;

η — полнота сгорания;

ϕ — коэффициент теплопотерь;

c_p — удельная массовая теплоемкость газовой среды помещения, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

T_m — среднеобъемная температура газовой среды помещения, К.

С учетом выражения (2) уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{V}{\Psi D_q} \frac{dN_{\text{чм}}}{d\tau} = 1 - \frac{N_{\text{чм}} V}{BD_q}, \quad (3)$$

где $B = \frac{c_p \rho_0 T_0 V}{\eta Q_h^p (1 - \phi)}$ — размерный комплекс, кг.

Масса горючего материала, сгоревшего к моменту времени τ , равна [1]:

$$\int_0^\tau \Psi d\tau = M_\tau, \quad (4)$$

где M_τ — масса сгоревшего горючего материала, кг.

В соответствии с работой [1]:

$$M_\tau = A \tau^n, \quad (5)$$

где A — размерный параметр, учитывающий удельную массовую скорость выгорания и площадь пожара, $\text{кг}/\text{с}^n$;

n — показатель степени, учитывающий изменение массы выгорающего материала по времени.

Уравнение (3) является обыкновенным дифференциальным уравнением с разделяющимися переменными, решение которого с учетом формулы (5) имеет вид [1]:

$$\tau = \left[\frac{B}{A} \left(1 - \frac{N_{\text{чм}} V}{BD_q} \right) \right]^{1/n}. \quad (6)$$

Зависимость локальной объемной концентрации частиц на высоте рабочей зоны помещения от среднеобъемной концентрации частиц имеет следующий вид [1]:

$$\frac{(N_{\text{чм}})_{\text{кр}}}{N_{\text{чм}}} = Z, \quad (7)$$

где $(N_{\text{чм}})_{\text{кр}}$ — локальная критическая объемная концентрация частиц дыма в помещении на высоте рабочей зоны, $1/\text{м}^3$;

$Z = \frac{z_{\text{рз}}}{H} \exp \left(1,4 \frac{z_{\text{рз}}}{H} \right)$ — параметр, характеризующий распределение величин опасных факторов по высоте помещения;

$z_{\text{рз}}$ — высота рабочей зоны, м;

H — высота помещения, м.

Тогда время блокирования путей эвакуации по объемной счетной концентрации твердых частиц дыма с учетом выражения (7) равно:

$$\tau_{\text{бл}}^{\text{ч}} = \left[\frac{B}{A} \left(1 - \frac{(N_{\text{чм}})_{\text{кр}} V}{BD_q Z} \right) \right]^{1/n}, \quad (8)$$

где $\tau_{\text{бл}}^{\text{ч}}$ — время блокирования путей эвакуации по объемной счетной концентрации твердых частиц дыма, с.

Время блокирования путей эвакуации по снижению видимости в дыму равно [1]:

$$\tau_{\text{бл}}^{\text{д}} = \left\{ \frac{B}{A} \ln \left[1 - \frac{I \ln(1,05 \alpha E)}{L_{\text{кр}} BD_m Z} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{n}}, \quad (9)$$

где $\tau_{\text{бл}}^{\text{д}}$ — время блокирования путей эвакуации по снижению видимости, с;

α — коэффициент отражения предметов на путях эвакуации;

E — начальная освещенность, лк;

L_{kp} — критическое значение дальности видимости, м;

D_m — удельный коэффициент дымообразования по оптической плотности дыма, $\text{м}^2/\text{кг}$.

Принимаем в соответствии с Приказом¹ $\phi = 0,3$;

Критическое значение дальности видимости принимаем равным $L_{kp} = \sqrt{F}$ (позволяет в общем виде оценить фактическое расстояние от наиболее удаленной точки помещения до эвакуационного выхода), где F — площадь пола помещения, м².

Рассматривалось круговое распространение пожара по поверхности твердого горючего материала [1]: $n = 3$.

Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Для достижения поставленной цели использовалась экспериментальная установка [19, 20]², представленная на рис. 1.

Распределение частиц дыма по их размерам и оценка их объемной концентрации определялись с использованием счетчика частиц OPC-N2 [18].

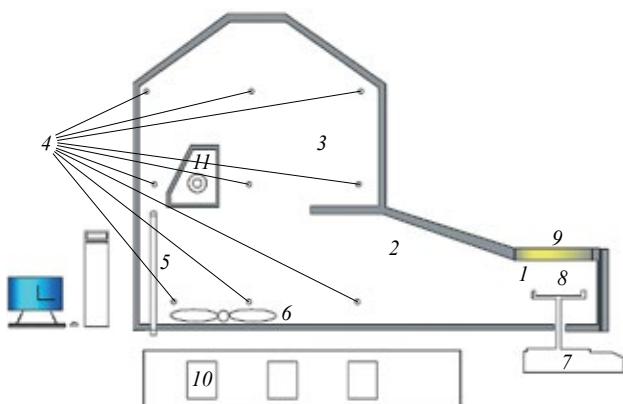


Рис. 1. Схема размещения OPC-N2 в экспериментальной установке: 1 — камера сгорания; 2 — переходной рукав; 3 — камера экспозиции; 4 — термопары; 5 — зонд отбора проб; 6 — вентилятор; 7 — весы; 8 — держатель образца; 9 — электронагревательный элемент; 10 — газоаналитическое оборудование; 11 — счетчик частиц OPC-N2

Fig. 1. Layout of the OPC-N2 in the experimental installation:
 1 — combustion chamber; 2 — adapter hose; 3 — exposure camera; 4 — thermocouples; 5 — sampling probe; 6 — fan; 7 — scales; 8 — specimen holder; 9 — electric heating element; 10 — gas analytical equipment; 11 — particle counter OPC-N2

¹ Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности : Приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140.

² Пузач С.В., Сулейкин Е.В., Акперов Р.Г. Установка для определения пожарной опасности конденсированных материалов при их термическом разложении: Патент Российской Федерации на полезную модель № 174688. Заявка № 2017113747, приоритет полезной модели 20.04.2017 г., дата государственной регистрации 26.10.2017.



Рис. 2. Образцы древесины, кабеля и элементов микроЭлектроники

Fig. 2. Specimens of wood, cable and microelectronics elements

Методика проведения эксперимента подробно приведена в работе [18].

В качестве исследуемых материалов взяты образцы древесины, изоляции кабелей и элементов микроэлектроники, которые представлены на рис. 2.

Результаты экспериментов и их анализ

Зависимости удельной массовой скорости выгорания от времени эксперимента для рассматриваемых горючих нагрузок представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что удельная массовая скорость выгорания образца древесины существенно выше соответствующих величин для изоляции кабеля и элементов микроелектроники.

Так как в соответствии с рис. 1 через счетчик частиц OPC-N2 (11) проходили не все частицы дыма, поступающие в камеру экспозиции (3), то для определения суммарного количества частиц дыма,

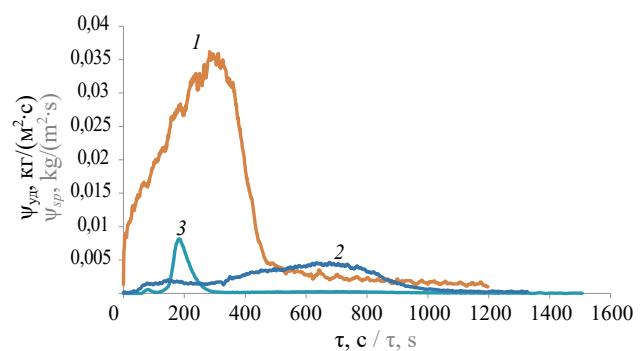


Рис. 3. Зависимости удельной массовой скорости выгорания для рассматриваемых горючих нагрузок: 1 — древесина; 2 — кабель; 3 — элементы микроэлектроники

Fig. 3. Dependencies of specific mass burn-up rate for considered combustible loads: 1 — wood; 2 — cable; 3 — microelectronics elements

находящихся в камере экспозиции за время эксперимента, применялись две приближенные оценки:

- оценка № 1:

$$S_1 = N_{\text{q,cp}} V_{\text{k}}, \quad (10)$$

где S_1 — суммарное количество частиц дыма, находящееся в камере экспозиции за время эксперимента;

$N_{\text{q,cp}}$ — средняя концентрация частиц, прошедших через счетчик частиц за время эксперимента, $1/\text{м}^3$;

V_{k} — объем камеры экспозиции установки (3) (рис. 1), м^3 ;

- оценка № 2:

$$S_2 = S_s, \quad (11)$$

где S_2 — суммарное количество частиц дыма, находящееся в камере экспозиции за время эксперимента;

S_s — количество всех частиц, прошедших через счетчик частиц за время эксперимента.

Средняя объемная концентрация частиц, прошедших через счетчик частиц за время эксперимента, равна:

$$N_{\text{q,cp}} = \frac{S_{\text{cp}}}{W\tau_s}, \quad (12)$$

где S_{cp} — среднее за время эксперимента количество частиц, прошедших через счетчик частиц;

W — объемный расход вентилятора счетчика частиц, $\text{м}^3/\text{s}$;

τ_s — время эксперимента, с.

Принимаем, что $V_{\text{k}} = 0,5887 \text{ м}^3$ [19, 20] и $W = 1 \text{ л}/\text{мин}$ (в соответствии с паспортом счетчика частиц OPC-N2).

При этом не учитывалось количество частиц, адсорбированных на стенках камеры экспозиции.

Таблица 1. Дымообразующая способность горючего материала по количеству частиц дыма
Table 1. Smoke generating capacity of combustible material by the number of smoke particles

Горючий материал Combustible material	Суммарное количество частиц дыма, находящееся в камере экспозиции за время эксперимента Total smoke particles in the exposure chamber during the experiment		$D_{\text{q}}, 1/\text{kg}$ $D_p, 1/\text{kg}$	
	S_1	S_2	D_{q1} D_{p1}	D_{q2} D_{p2}
Древесина Wood	$4,75 \cdot 10^7$	$9,54 \cdot 10^5$	$6,05 \cdot 10^9$	$1,22 \cdot 10^8$
Кабель Cable	$3,84 \cdot 10^{12}$	$1,45 \cdot 10^{11}$	$2,96 \cdot 10^{14}$	$1,11 \cdot 10^{13}$
Элементы микроэлектроники Microelectronics elements	$8,3 \cdot 10^7$	$2,4 \cdot 10^6$	$1,21 \cdot 10^{10}$	$3,5 \cdot 10^8$

Дымообразующая способность горючего материала по количеству частиц дыма определялась по следующим формулам:

- оценка № 1:

$$D_{\text{q1}} = \frac{S_1}{\int_0^{\tau_s} \Psi dt}; \quad (13)$$

- оценка № 2:

$$D_{\text{q2}} = \frac{S_2}{\int_0^{\tau_s} \Psi dt}. \quad (14)$$

Результаты обработки полученных экспериментальных данных по дымообразующей способности горючего материала по количеству частиц дыма с эквивалентным диаметром $d \leq 2,5 \text{ мкм}$ в соответствии с формулами (10)–(14) представлены в табл. 1.

Исходные данные для проведения численных экспериментов

Размеры помещения принимались следующими:

- площадь пола помещения изменялась в диапазоне $F = 18 \div 576 \text{ м}^2$;
- высота помещения равнялась $H = 3$ и 6 м ;
- объем помещения изменялся соответственно в пределах $V = 54 \div 3456 \text{ м}^3$.

Величина площади пола была пропорциональна 6 м — расстоянию между несущими колоннами.

Для проведения численных экспериментов рассматривались горючие нагрузки, параметры которых наиболее близки к исследуемым горючим материалам и представлены в табл. 2 ($w_{\text{пп}}$ — линейная скорость распространения пламени, $\text{м}/\text{с}$; L_{O_2} — удельный коэффициент потребления кислорода).

При проведении численных экспериментов параметры изоляции кабелей и элементов микроэлектро-

Таблица 2. Параметры рассматриваемых горючих нагрузок
Table 2. Parameters of combustible loads under consideration

Параметры Parameters	Электрокабель АВВГ; ПВХ оболочка + + изоляция [1] AVVG electric cable; PVC sheath + + insulation [1]	Штабель древесины; хвойный + + лиственый лес [1] Wood stack; coniferous + + deciduous forest [1]
$Q_{\text{ш}}^{\text{p}}$, МДж/кг Q_l^{o} , MJ/kg	25	13,8
$\psi_{\text{уд}}$, кг/(м ² ·с) ψ_{sp} , kg/(m ² ·s)	0,0244	0,0145
D_m , м ² /кг D_m , m ² /kg	635	57
$w_{\text{пп}}$, м/с w_{β} , m/s	0,0071	0,0585
L_{O_2}	-2,19	-1,15

ники принимались как для горючей нагрузки «Электрокабель АВВГ; ПВХ оболочка + изоляция» [1].

Рассматриваемые горючие нагрузки могут находиться как в общественных зданиях, так и в зданиях производственного назначения (например, в складах готовой продукции) (табл. 2).

Предельно допустимое значение объемной счетной концентрации частиц дыма в соответствии с ГОСТ³ равно $N_{\text{u},\text{kp}} = 1,0 \cdot 10^7 \text{ 1/m}^3$.

Таблица 3. Времена блокирования путей эвакуации по потере видимости и по достижению объемной концентрации твердых частиц дыма с диаметром $d \leq 2,5 \text{ мкг/м}^3$ в случае горения кабеля
Table 3. Blocking times for escape routes by loss of visibility and by reaching the volumetric concentration of solid smoke particles with a diameter of $d \leq 2.5 \mu\text{g/m}^3$ in the case of burning of cable

Номер Number	F , м ² F , m ²	H , м H , m	V_{cb} , м ³ V_f , m ³	$\tau_{\text{бл}}^{\text{u}}$, с τ_b^p , s	$\frac{\tau_{\text{бл}}^{\text{u}}}{\tau_b^p}$, с			
					Оценка № 1 Estimation No. 1		Оценка № 2 Estimation No. 2	
					$N_{\text{u},\text{kp}} = 1,56 \cdot 10^8 \text{ 1/m}^3$ $N_{p,cr} = 1.56 \cdot 10^8 \text{ 1/m}^3$	$N_{\text{u},\text{kp}} = 1,0 \cdot 10^7 \text{ 1/m}^3$ $N_{p,cr} = 1.0 \cdot 10^7 \text{ 1/m}^3$	$N_{\text{u},\text{kp}} = 1,56 \cdot 10^8 \text{ 1/m}^3$ $N_{p,cr} = 1.56 \cdot 10^8 \text{ 1/m}^3$	$N_{\text{u},\text{kp}} = 1,0 \cdot 10^7 \text{ 1/m}^3$ $N_{p,cr} = 1.0 \cdot 10^7 \text{ 1/m}^3$
1	18	3	43,2	30,3	2,4	1,0	7,2	2,9
2	36	3	86,4	34,0	3,0	1,2	9,1	3,6
3	144	3	345,6	42,7	4,8	1,9	14,4	5,8
4	576	3	1382,4	53,7	7,7	3,1	22,9	9,2
5	18	6	86,4	55,7	4,4	1,8	13,1	5,2
6	36	6	172,8	62,2	5,5	2,2	16,5	6,6
7	144	6	691,2	77,7	8,7	3,5	26,1	10,5
8	576,0	6	2764,8	97,6	13,9	5,6	41,5	16,6

³ ГОСТ ИСО 14644-1-2002. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха. Дата введения: 2004-04-01.

Предельно допустимое значение массовой концентрации частиц дыма в соответствии с ГН⁴ для частиц размером $\text{PM}_{2,5}$ равно максимальной разовой концентрации $X_{\text{kp}} = 160 \text{ мкг/м}^3$.

В соответствии с результатами экспериментов, представленных в работе [18], предельно допустимому значению массовой концентрации частиц соответствуют следующие предельно допустимые объемные концентрации частиц ($N_{\text{u},\text{kp}}$, 1/m³):

- древесина: $N_{\text{u},\text{kp}} = 1,7 \cdot 10^8 \text{ 1/m}^3$;
- кабель: массовая концентрация сразу превысила предельно допустимое значение: $X = 1107,6 \text{ мкг/м}^3 > X_{\text{kp}} = 160 \text{ мкг/м}^3$;
- элементы микроэлектроники: $N_{\text{u},\text{kp}} = 1,56 \cdot 10^8 \text{ 1/m}^3$.

Различия в величинах предельно допустимых объемных концентрациях частиц, в первую очередь, объясняются отличием у образующихся при горении исследуемых материалов частиц их объемной формы и плотности.

Результаты численных экспериментов

Результаты расчета времен блокирования путей эвакуации по снижению видимости и по объемной концентрации твердых частиц дыма с диаметром $d \leq 2,5 \text{ мкг/м}^3$ для рассматриваемых горючих нагрузок представлены в табл. 3–5, где $V_{\text{cb}} = 0,8 \cdot V$ — свободный объем помещения, м³.

⁴ ГН 2.1.6.2604-10. Предельные концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест : Дополнение № 8 к ГН 2.1.6.1338-03.

Таблица 4. Времена блокирования путей эвакуации по потере видимости и по достижению объемной концентрации твердых частиц дыма с диаметром $d \leq 2,5 \text{ мкг}/\text{м}^3$ в случае горения древесины

Table 4. Blocking times of escape routes by loss of visibility and by reaching the volumetric concentration of solid smoke particles with diameter $d \leq 2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in case of burning of wood

Номер Number	$F, \text{м}^2$ F, m^2	$H, \text{м}$ H, m	$V_{cb}, \text{м}^3$ V_f, m^3	$\tau_{61}^n, \text{с}$ τ_b^p, s	$\frac{\tau_{61}^n, \text{с}}{\tau_b^p, \text{s}}$			
					Оценка № 1 Estimation No. 1		Оценка № 2 Estimation No. 2	
					$N_{u,kp} = 1,56 \cdot 10^8 \text{ 1/m}^3$ $N_{p,cr} = 1.56 \cdot 10^8 \text{ 1/m}^3$	$N_{u,kp} = 1,0 \cdot 10^7 \text{ 1/m}^3$ $N_{p,cr} = 1.0 \cdot 10^7 \text{ 1/m}^3$	$N_{u,kp} = 1,56 \cdot 10^8 \text{ 1/m}^3$ $N_{p,cr} = 1.56 \cdot 10^8 \text{ 1/m}^3$	$N_{u,kp} = 1,0 \cdot 10^7 \text{ 1/m}^3$ $N_{p,cr} = 1.0 \cdot 10^7 \text{ 1/m}^3$
1	18	3	43,2	20,5	30,7	10,4	—	—
2	36	3	86,4	22,7	38,6	13,1	—	—
3	144	3	345,6	28,2	61,3	20,7	—	—
4	576	3	1382,4	35,2	97,3	32,9	—	—
5	18	6	86,4	43,4	—	19,0	—	—
6	36	6	172,8	44,8	—	24,0	—	—
7	144	6	691,2	52,8	—	38,0	—	—
8	576,0	6	2764,8	64,8	—	60,4	—	—

Примечание: блокирования путей эвакуации нет.

Note: no blocking of escape routes.

Таблица 5. Времена блокирования путей эвакуации по потере видимости и по достижению объемной концентрации твердых частиц дыма с диаметром $d \leq 2,5 \text{ мкг}/\text{м}^3$ в случае горения элементов микроэлектроники

Table 5. Blocking times of escape routes by loss of visibility and by reaching the volumetric concentration of solid smoke particles with diameter $d \leq 2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in case of burning of elements of electronic

Номер Number	$F, \text{м}^2$ F, m^2	$H, \text{м}$ H, m	$V_{cb}, \text{м}^3$ V_f, m^3	$\tau_{61}^n, \text{с}$ τ_b^p, s	$\frac{\tau_{61}^n, \text{с}}{\tau_b^p, \text{s}}$			
					Оценка № 1 Estimation No. 1		Оценка № 2 Estimation No. 2	
					$N_{u,kp} = 1,56 \cdot 10^8 \text{ 1/m}^3$ $N_{p,cr} = 1.56 \cdot 10^8 \text{ 1/m}^3$	$N_{u,kp} = 1,0 \cdot 10^7 \text{ 1/m}^3$ $N_{p,cr} = 1.0 \cdot 10^7 \text{ 1/m}^3$	$N_{u,kp} = 1,56 \cdot 10^8 \text{ 1/m}^3$ $N_{p,cr} = 1.56 \cdot 10^8 \text{ 1/m}^3$	$N_{u,kp} = 1,0 \cdot 10^7 \text{ 1/m}^3$ $N_{p,cr} = 1.0 \cdot 10^7 \text{ 1/m}^3$
1	18	3	43,2	30,3	78,4	28,2	—	—
2	36	3	86,4	34,0	98,8	35,5	—	—
3	144	3	345,6	42,7	156,8	56,4	—	—
4	576	3	1382,4	53,7	248,9	89,5	—	—
5	18	6	86,4	55,7	—	51,7	—	—
6	36	6	172,8	62,2	—	65,1	—	—
7	144	6	691,2	77,7	—	103,4	—	—
8	576,0	6	2764,8	97,6	—	164,1	—	—

В случае горения образцов кабеля из табл. 2 видно, что время блокирования путей эвакуации по объемной счетной концентрации твердых частиц дыма меньше соответствующего времени по снижению видимости для всех размеров помещений.

При горении древесины при максимальной оценке количества образовавшихся частиц (оценка № 1) время блокирования путей эвакуации по объемной концентрации твердых частиц дыма меньше соответствующего времени по снижению видимости

для всех размеров помещений. В случае минимальной оценки количества частиц (оценка № 2) блокирования путей эвакуации по концентрации частиц не происходит.

При горении элементов микроэлектроники при максимальной оценке количества образовавшихся частиц (оценка № 1) время блокирования путей эвакуации по объемной концентрации твердых частиц дыма больше соответствующего времени по снижению видимости за исключением помещений мини-

мальных размеров ($F = 18 \text{ м}^2$ для $H = 3 \text{ м}$ и $H = 6 \text{ м}$). В случае минимальной оценки количества частиц (оценка № 2) блокирования путей эвакуации по концентрации частиц не происходит.

Выводы

Наиболее опасные по воздействию на организм человека во время его эвакуации при пожаре мелкодисперсные твердые частицы дыма с эквивалентным диаметром $d \leq 2,5 \text{ мкм}$ ($\text{PM}_{2,5}$, 3-я группа воздействия) могут быть опасным фактором пожара, первым блокирующим пути эвакуации.

Поэтому необходимо проведение дальнейших исследований для решения следующих научных и практических задач:

- совершенствование экспериментального метода с целью повышения точности определения размеров, а также объемных счетных и массовых концентраций частиц дыма, образующегося при горении современных горючих веществ и материалов;
- использование при расчете пожарного риска нового опасного фактора пожара — объемной счетной концентрации и размеров частиц дыма;
- разработка новых средств защиты органов дыхания человека при пожаре.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кошмаров Ю.А., Пузач С.В., Лебедченко О.С., Нгуен Т.Х. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. М. : Академия ГПС МЧС России, 2021. 148 с.
2. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. М. : Стройиздат, 1990. 424 с.
3. Зотов Ю.С. Процесс задымления помещений при пожаре и разработка метода необходимого времени эвакуации людей : дис. ... канд. техн. наук. М., 1989. 273 с.
4. Purser D.A., McAllister J.L. Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat // SFPE Handbook of fire protection engineering. Edition: 5th Chapter: 63. New York : Publisher: Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_63
5. Суриков А.В., Лешенюк Н.С. Методика расчета видимости при пожаре // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларусь. 2019. Т. 3. № 4. С. 412–419. DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-4.412
6. Burlacu D., Georgescu A.M., Vartires A., Marinescu I.N. Experimental Evaluation of Visibility in Simulated Smoke // International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM). 2019. DOI: 10.1109/CIEM46456.2019.8937634
7. Surikov A.B., Leshenyuk H.C. Determination of building materials's smoke generating characteristics and calculating the visibility in a fire // Journal of Civil Protection. 2021. No. 5 (1). Pp. 5–19. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.5
8. Маркизова Н.Ф., Преображенская Т.Н., Башарин В.А., Гребенюк А.Н. Токсичные компоненты пожаров : Серия «Токсикология для врачей». СПб. : «ООО Издательство ФОЛИАНТ», 2008. 208 с.
9. Alarie Y. Toxicity of fire smoke // Crit Rev Toxicol. 2002. No. 32 (4). Pp. 259–89. DOI: 10.1080/20024091064246
10. Zhdanova A.O., Volkov R.V., Kuznetsov G.V., Kopylov N.P., Strizhak P.A., Syshkina E.Y. et al. Solid particle deposition of indoor material combustion products // Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 162. Pp. 494–512. DOI: 10.1016/j.psep.2022.04.033
11. Mahamuni G., Rutherford J., Davis J., Molnar E. Excitation-emission matrix spectroscopy for analysis of chemical composition of combustion generated particulate matter // Environ. Sci. Technol. 2020. Pp. 8198–8209. DOI: 10.1021/acs.est.0c01110
12. Lemkowitz S.M., Pasman H.J. A review of the fire and explosion hazards of particulates // KONA Powder and Particle Journal. 2014. Vol. 31. Pp. 53–81. DOI: 10.14356/kona.2014010
13. Невмержицкий Н.В. Методика оценки и прогнозирования экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $\text{PM}_{2,5}$: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2017. 154 с.
14. Зягинцева А.В., Павленко А.А. Основы токсикологии : учеб. пособие. Воронеж : ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2012. 251 с.
15. Bartzis G., Kalimeri K., Sakellaris A. Environmental data treatment to support exposure studies: The statistical behavior for NO_2 , O_3 , PM_{10} and $\text{PM}_{2,5}$ air concentrations in Europe // Environmental Research. 2020. Vol. 81. P. 108864. DOI: 10.1016/j.envres.2019.108864
16. Физиология человека : учебник / под ред. В.М. Покровского, Г.Ф. Коротько. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Медицина, 2003. 656 с.
17. Внутренние болезни. В 10 кн. Кн. 6. Болезни дыхательных путей. Болезни почек и мочевых путей : пер. с англ. / под ред. Е. Браунвальда, К.Дж. Иссельбахера, Р.Г. Петерсдорфаидр. М. : Медицина, 1995. 416 с.
18. Пузач С.В., Журавлев Ю.Ю. Болдушиков О.Б., Акперов Р.Г. Экспериментальная оценка объемной концентрации и размеров твердых частиц дыма, образующихся при терморазложении горючих матери-

- алов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2024. № 2. С. 5–12. DOI: 10.25257/FE.2024.2.5-12
19. 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
 20. Пузач С.В., Бачурин Д.В., Акперов Р.Г., Болдрушкиев О.Б., Балаев А.А. Образование токсичных газов при горении мягких игрушек в многофункциональных торгово-развлекательных комплексах // Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety. 2023. Т. 32. № 1. С. 41–50. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.41-50

REFERENCES

1. Koshmarov Yu.A., Puzach S.V., Lebedchenko O.S., Nguyen T.Kh. Prediction of indoor fire hazards. *Academy of GPS EMERCOM of Russia*. Moscow, 2021; 148. (rus).
2. Draisdale D. Introduction to fire dynamics. *Stroyizdat*. Moscow, 1990; 424. (rus).
3. Zотов Ю.С. *The process of smoke in a fire and the development of a method for the necessary time for evacuation of people : dissertation of candidate of technical sciences*. Moscow, 1989; 273. (rus).
4. Purser D.A., McAllister J.L. Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat. *SFPE Handbook of fire protection engineering*. Edition: 5th Chapter: 63. New York, Publisher: Springer, 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_63
5. Surikov A.V., Leshenyuk N.S. Methods for calculating visibility in case of fire. *Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergencies of Belarus*. 2019; 3(4):412–419. DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-4.412 (rus).
6. Burlacu D., Georgescu A.M., Vartires A., Marinescu I.N. Experimental Evaluation of Visibility in Simulated Smoke. *International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM)*. 2019. DOI: 10.1109/CIEM46456.2019.8937634
7. Surikov A.B., Leshenyuk H.C. Determination of building materials's smoke generating characteristics and calculating the visibility in a fire. *Journal of Civil Protection*. 2021; 5(1):5-19. DOI: 10.33408/2519-237X.2021.5-1.5
8. Markizova N.F., Preobrazhenskaya T.N., Basharin V.A., Grebenyuk A.N. *Toxic components of fires : Series "Toxicology for doctors"*. St. Petersburg, LLC Publishing House FOLIANT, 2008; 208. (rus).
9. Alarie Y. Toxicity of fire smoke. *Crit Rev Toxicol*. 2002; 32(4):259–89. DOI: 10.1080/20024091064246
10. Zhdanova A.O., Volkov R.V., Kuznetsov G.V., Kopylov N.P., Strizhak P.A., Syshkina E.Y. et al. Solid particle deposition of indoor material combustion products. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022; 162:494–512. DOI: 10.1016/j.psep.2022.04.033
11. Mahamuni G., Rutherford J., Davis J., Molnar E. Excitation-emission matrix spectroscopy for analysis of chemical composition of combustion generated particulate matter. *Environ. Sci. Technol.* 2020; 8198–8209. DOI: 10.1021/acs.est.0c01110
12. Lemkowitz S.M., Pasman H.J. A review of the fire and explosion hazards of particulates. *KONA Powder and Particle Journal*. 2014; 31:53–81. DOI: 10.14356/kona.2014010
13. Nevmerzhitsky N.V. *Methodology for assessing and predicting extreme air pollution on highways with fine suspended particles PM₁₀ and PM_{2.5} : dissertation of candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2017; 154. (rus).
14. Zvyagintseva A.V., Pavlenko A.A. *Fundamentals of toxicology : tutory manual*. Voronezh, FSBEI HPE “Voronezh State Technical University”, 2012; 251. (rus).
15. Bartzis G., Kalimeri K., Sakellaris A. Environmental data treatment to support exposure studies: The statistical behavior for NO₂, O₃, PM₁₀ and PM_{2.5} air concentrations in Europe. *Environmental Research*. 2020; 181:108864. DOI: 10.1016/j.envres.2019.108864
16. *Human physiology : textbook / ed. V.M. Pokrovsky, G.F. Korotko*. 2nd ed., Revised and add. Moscow, Medicine, 2003: 656. (rus).
17. *Internal diseases. In 10 books. Book 6. Respiratory tract diseases. Kidney and urinary tract diseases : per. from English / ed. E. Braunwald, K.J. Isselbacher, R.G. Petersdorfadr*. Moscow, Medicine, 1995; 416.
18. Puzach S.V., Zhuravlev Yu.Yu., Boldrushkiev O.B., Akperov R.G. Experimental assessment of volume concentration and size of solid smoke particles formed during thermal decomposition of combustible materials. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2024; 2:5-12. DOI: 10.25257/FE.2024.2.5-12 (rus).
19. Puzach S.V., Akperov R.G. Experimental determination of the specific coefficient of release of carbon monoxide during a fire in the room. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(5):18-25. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.18-25 (rus).
20. Puzach S.V., Bachurin D.V., Akperov R.G., Boldrushkiev O.B., Balaev A.A. Generation of toxic gases during combustion of stuffed toys in multifunction shopping malls. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2023; 32(1):41-50. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.01.41-50

Поступила 07.03.2025, после доработки 22.03.2025;

принята к публикации 25.03.2025

Received March 7, 2025; Received in revised form March 22, 2025;

Accepted March 25, 2025

Информация об авторах

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д.т.н., 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, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; SPIN-код: 5637-8461; ResearcherID: U-2907-2019; AuthorID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

ЖУРАВЛЕВ Юрий Юрьевич, начальник отдела нормативно-технического и перспективного развития пожарной безопасности, Департамент надзорной деятельности и профилактической работы МЧС России, Россия, 121357, г. Москва, ул. Ватутина, 1; SPIN-код: 8755-5560; ORCID: 0000-0001-8017-9642; e-mail: Zhur001@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored 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, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; SPIN-code: 5637-8461; ResearcherID: U-2907-2019; AuthorID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Yuri Yu. ZHURAVLEV, Head of the Department of Regulatory-Technical and Prospective Development, Fire Safety Department of Supervision and Fire Prevention of EMERCOM of Russia, Vatutina St., 1, Moscow, 121357, Russian Federation; SPIN-code: 8755-5560; ORCID: 0000-0001-8017-9642; e-mail: Zhur001@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interest.