

Влияние условий проведения испытаний в камере сгорания мелкомасштабной экспериментальной установки на дымообразующую способность древесины

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

- ¹ Академия Государственной противопожарной службы МЧС России
(Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)
- ² Кокшетауский технический институт Комитета по чрезвычайным ситуациям
МВД Республики Казахстан (Казахстан, 020000, г. Кокшетау, ул. Акан Серы, 136)

РЕЗЮМЕ

Введение. Для проведения расчетов времени блокирования путей эвакуации по потере видимости решающее значение имеет удельный коэффициент дымообразования, который определяется в маломасштабной экспериментальной установке. Однако параметры процесса дымообразования зависят от множества факторов, влияние которых изучено недостаточно. Поэтому необходимо научное обоснование условий проведения испытаний по определению удельного коэффициента дымообразования.

Цель и задачи. Целью настоящей работы является исследование влияния условий в камере сгорания на дымообразующую способность древесины. Для достижения данной цели: выполнена модификация существующей экспериментальной установки, позволяющая определять оптическую плотность дыма внутри экспозиционной камеры; проведены экспериментальные исследования горения древесины, в ходе которых изменилась оптическая плотность дыма в зависимости от расстояния между электронагревательным излучателем в камере сгорания установки и поверхностью образца исследуемого материала.

Методы. Измерения температуры и плотности теплового потока внутри камеры сгорания проводились на различном расстоянии от электронагревательного излучателя, на сертифицированном оборудовании в условно герметичном объеме экспериментальной установки.

Результаты. Эксперименты показали, что удельный коэффициент дымообразования D_m существенно зависит от условий испытаний в камере сгорания. Коэффициент дымообразования, полученный на модифицированной установке при горении древесины хвойных пород, изменяется от 22,1 до 56,9 Нп·м²/кг в режиме горения и от 82,9 до 134,5 Нп·м²/кг в режиме тления. Для хвойных древесных материалов значение D_m , используемое при моделировании пожаров, равно 57–61 Нп·м²/кг, что соизмеримо с диапазоном его изменения в проведенных экспериментах. Значения коэффициента дымообразования, полученные на стандартизированной установке (ГОСТ 12.1.044–2018), значительно выше полученных на модифицированной установке: на 233,1 Нп·м²/кг в режиме горения и на 640,5 Нп·м²/кг в режиме тления.

Заключение. Конструктивные особенности экспериментальной установки и условия в камере сгорания оказывают сильное влияние на величину удельного коэффициента дымообразования горючего материала. Для достоверного расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости необходимо проведение дальнейших исследований, позволяющих научно обосновать методику определения коэффициента дымообразования.

Ключевые слова: пожар; пожарная нагрузка; тепловой поток; потеря видимости; пути эвакуации; коэффициент дымообразования.

Для цитирования: Пузач С. В., Мустафин В. М., 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.

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

Influence of conditions in the combustion chamber of small-scale installation on smoke generating ability of wood

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

- ¹ State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation)
² Kokshetau Technical Institute, Committee for Emergency Situations of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan (Akan Sera St., 136, Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan)

ABSTRACT

Introduction. In order to calculate the time for blocking escape routes by loss of visibility, the value of the smoke generation coefficient, which is determined in a small-scale experimental installation, is critical. However, the parameters of the smoke formation process depend on a variety of factors whose influence has not been sufficiently studied. Therefore, scientific justification of test conditions for determination of specific smoke formation factor is necessary.

Aims and purposes. The aim of this work is to study the influence of conditions in the combustion chamber on the smoke generating ability of wood. To achieve this aim: a modification of the existing experimental installation was performed, which allowed determining the optical density of smoke inside the exposure chamber; experimental studies of burning of wood were carried out, during which the optical density of the smoke was measured on the different distances between the electric heating emitter in the combustion chamber of the installation and the surface of the sample of the material under study.

Methods. Measurements of temperature and heat flux density inside the combustion chamber were carried out at different distances from the electric radiator, using certified equipment in a conditionally sealed volume of the experimental installation.

Results. The experiments showed that the specific smoke generation coefficient significantly depends on the test conditions in the combustion chamber. The smoke generation coefficient obtained at the modified installation during the burning of coniferous wood varies within $22.1\text{--}56.9 \text{ Np}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ in the combustion mode and $82.9\text{--}134.5 \text{ Np}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ in the smoldering mode. For coniferous wood materials, the value of this coefficient used in modeling fires is $57\text{--}61 \text{ Np}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$, which is comparable with the range of its changes in the experiments. The values of the smoke generation coefficient obtained at the standard installation GOST 12.1.044–2018 significantly exceed the values of the above coefficient obtained at the developed installation. The difference in smoke generation coefficients obtained by the proposed method and the standard method exceeded $233.1 \text{ Np}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ in the combustion mode and $640.5 \text{ Np}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ in the smoldering mode.

Conclusion. The design features of the experimental installation and the test conditions, significantly change the conditions in the combustion chamber. This fact has a strong effect on the specific smoke generation coefficient of the combustible material. Therefore, in order to calculate reliably the time of blocking evacuation routes due to loss of visibility, further investigations are necessary to substantiate scientifically the method for determining the above mentioned coefficient.

Keywords: fire; fire load; heat flux; loss of visibility; escape routes; specific smoke generation coefficient.

For citation: S. V. Puzach, V. M. Mustafin, R. G. Akperov. Influence of conditions in the combustion chamber of small-scale installation on smoke generating ability of wood. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 23–31 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.23-31.

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

Введение

Безопасная эвакуация людей без индивидуальных средств защиты при пожаре возможна при условии, если время для эвакуации последнего человека из помещения или здания будет меньше времени, которое требуется для достижения опасными факторами пожара критических значений [1].

Как правило, в большинстве случаев снижение видимости в дыму представляет собой один из наиболее опасных факторов пожара, так как он в первую очередь достигает критических для человека значений. В результате его воздействия на человека может возникнуть паника, дезориентация в пространстве и отравление токсичными продуктами горения [2, 3].

Скорость образования и распространения дыма зависит от многих факторов [4–9]. Важную роль в процессе дымообразования играет химический состав и физические параметры горючей нагрузки [10], а также внешняя среда и количество окислителя [11–13]. Поэтому важно при моделировании пожара учитывать наихудшие свойства горючих материалов, которые могут быть определены только опытным путем при различных условиях испытаний в экспериментальной установке.

В настоящее время для определения пожароопасных свойств строительных и отделочных материалов используются методы, описанные в ГОСТ 12.1.044–2018. Одним из них является метод определения дымообразующей способности, который позволяет определить коэффициент дымообразования — один из ключевых параметров для расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму.

Согласно исследованиям [14–18] удельный коэффициент дымообразования D_m ($\text{Нп}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$) для необработанной древесины, полученный стандартным методом, превышает $1000 \text{ Нп}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$, что дает основание относить ее к группе материалов с высокой дымообразующей способностью. Однако при моделировании пожара среднее значение D_m для древесины принимается равным $57 \text{ Нп}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$ [19], что существенно меньше указанного значения. Поэтому для выполнения расчетов времени блокирования путей эвакуации по потере видимости необходимо научно обосновать условия проведения испытаний по определению удельного коэффициента дымообразования.

Целью настоящей работы является исследование влияния условий проведения испытаний в ка-

мере сгорания мелкомасштабной экспериментальной установки на дымообразующую способность древесины.

Для достижения данной цели:

- выполнена модификация существующей экспериментальной установки для определения пожарной опасности конденсированных материалов [20], что дало возможность определять оптическую плотность дыма внутри экспозиционной камеры;
- проведены экспериментальные исследования горения древесины в модифицированной установке, в ходе которых измерялась температура и плотность теплового потока в зависимости от расстояния между нагревательным элементом в камере сгорания установки и поверхностью образца исследуемого материала.

Модифицированная экспериментальная установка

Исследования проводились на экспериментальной установке для определения пожарной опасности конденсированных материалов [13], которая была модифицирована для измерения оптической плотности дыма внутри экспозиционной камеры (рис. 1).

Корпус установки выполнен из листовой нержавеющей стали толщиной $(2,0 \pm 0,1)$ мм с теплоизолирующим покрытием с внутренней стороны толщиной $(30 \pm 0,5)$ мм и состоит из трех основных частей: камеры сгорания 1, переходного рукава 2 и экспозиционной камеры 3.

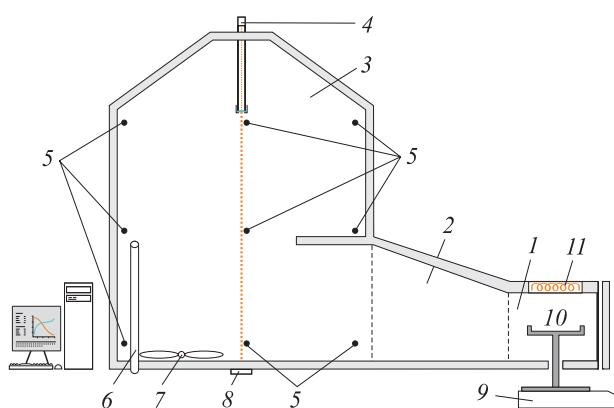


Рис. 1. Схема модифицированной экспериментальной установки: 1 — камера сгорания; 2 — переходной рукав; 3 — экспозиционная камера; 4 — лазерный модуль; 5 — термопары; 6 — зонд отбора газа; 7 — вентилятор; 8 — фоточувствительный элемент; 9 — электронные весы; 10 — держатель образца; 11 — электронагревательный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

Fig. 1. Scheme of the modified experimental installation: 1 — combustion chamber; 2 — adapter sleeve; 3 — exposure camera; 4 — laser module; 5 — thermocouples; 6 — gas sampling probe; 7 — fan; 8 — photosensitive element; 9 — electronic scales; 10 — sample holder; 11 — electric heating emitter

Камера сгорания оборудована электронагревательным элементом 11 с системой водяного охлаждения, смотровым кварцевым стеклом, держателем образца 10, установленным на электронных весах 9. Переходной рукав отделен от камеры сгорания стальным шибером.

Экспозиционная камера оснащена зондом отбора газов 6, вентилятором 7, а также по всему объему низкоинерционными бронированными термопарами 5 с диапазоном измерений от минус 40 до $+1100^{\circ}\text{C}$ и с погрешностью не более $\pm 1,5t$ (где t — температура, $^{\circ}\text{C}$).

Схема камеры сгорания экспериментальной установки приведена на рис. 2. Расстояние L между нагревательным элементом в камере сгорания установки и поверхностью образца исследуемого материала изменяется с помощью системы регулировки расстояния 7.

В отличие от метода ГОСТ 12.1.044—2018 в камере сгорания модифицированной установки отсут-

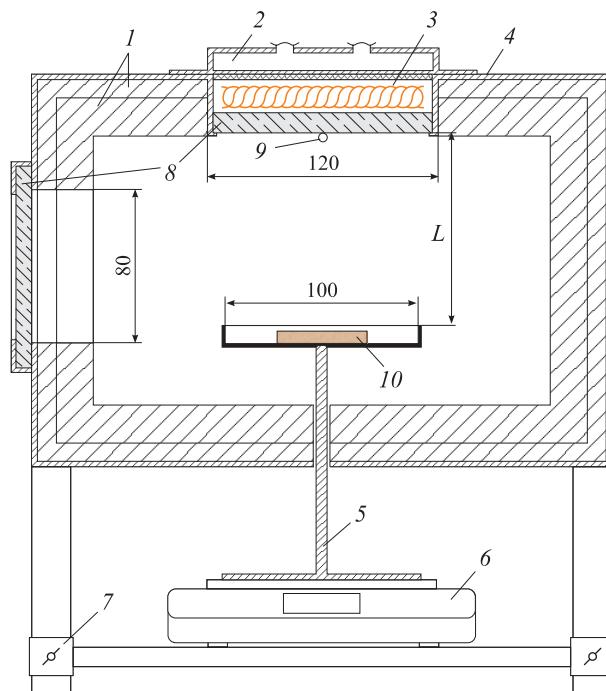


Рис. 2. Схема камеры сгорания экспериментальной установки: 1 — теплоизолирующий слой; 2 — камера водяного охлаждения; 3 — электронагревательный излучатель; 4 — наружная стенка камеры сгорания; 5 — держатель образца; 6 — электронные весы; 7 — система регулировки расстояния от электронагревательного излучателя до испытуемого образца; 8 — кварцевое стекло; 9 — низкоинерционная термопара; 10 — образец древесины

Fig. 2. Scheme of the combustion chamber of the experimental installation: 1 — heat insulation layer; 2 — water cooling chamber; 3 — electric heating radiator; 4 — outer wall of the combustion chamber; 5 — sample holder; 6 — electronic scales; 7 — system for adjusting the distance from the electric heating element to the test sample; 8 — quartz glass; 9 — low inertia thermocouple; 10 — wood sample

ствует искусственный источник зажигания (газовая горелка).

При модификации установки в центре нижней стенки экспозиционной камеры установлен фоточувствительный элемент 8 (см. рис. 1) для преобразования света в электрическую энергию. Перпендикулярно этому элементу в верхней части экспозиционной камеры находится лазерный модуль 4 с длиной волны излучения 650 нм. Чтобы избежать замутнения линзы во время огневых испытаний от нагрева, модуль установлен вне установки.

В верхней части экспозиционной камеры вставлена герметичная алюминиевая трубка, нижняя часть которой выполнена из кварцевого стекла. Через эту трубку проходит луч лазера от лазерного модуля через задымленную среду камеры во время огневых испытаний. Расстояние от нижней поверхности стекла до фоточувствительного элемента составляет 800 мм.

Для измерения плотности лучистого теплового потока использован водоохлаждаемый датчик теплового потока типа датчика Гордона ФОА-013 и регистрирующий прибор с диапазоном измерений от 0 до 100 мВ. Погрешность измерения плотности теплового потока не превышает $\pm 8\%$.

Размеры модифицированной установки отличаются от стандартизированной по ГОСТ 12.1.044–2018:

- объем камеры сгорания соответственно 0,012 и 0,003 m^3 ;
- объем экспозиционной камеры соответственно 0,47 и 0,512 m^3 ;
- общий внутренний объем соответственно 0,482 и 0,515 m^3 .

Как видим, общий внутренний объем модифицированной установки меньше по сравнению со стандартизированной на 6,4 %.

Методика проведения экспериментов

Испытание начинается с запуска контура нагревательного элемента включением ПК и запуска регистрирующих программ с последующей проверкой отклика датчиков.

Задается рабочая температура на поверхности нагревательного элемента t_h . Датчик теплового потока устанавливается на заданном расстоянии от его поверхности.

При выходе температуры и плотности теплового потока на установленные значения открывают заслонку переходного рукава и дверцу камеры сгорания. После этого предварительно взвешенный образец материала помещают в камеру и закрывают дверцу.

Дымообразующая способность древесины исследовалась в двух режимах горения (пламенное горе-

ние и тление). Режим определялся визуально по наличию видимой части пламени.

В ходе испытания фиксировались следующие параметры:

- масса образца (каждые 3–10 с);
- температура в объеме экспозиционной камеры;
- оптическая плотность дыма.

Удельный коэффициент дымообразования горючего материала определялся по следующей формуле (ГОСТ 12.1.044–2018):

$$D_m = \frac{V}{lm} \ln \left(\frac{I_0}{I_{\min}} \right), \quad (1)$$

где D_m — удельный коэффициент дымообразования горючего материала, $N\cdot m^2/kg$;

V — объем экспозиционной камеры, m^3 ;

l — длина пути луча света в задымленной среде экспозиционной камеры, м;

m — масса образца, кг;

I_0, I_{\min} — начальное и конечное светопропускание, %.

Калибровка электронагревательного оборудования

Для исследования процесса терморазложения образца горючего материала на различном расстоянии от электронагревательного оборудования была проведена его калибровка в отсутствие горения образца.

При этом определялись зависимости плотности теплового потока q в газовой среде камеры сгорания установки на заданном расстоянии L от поверхности нагревательного элемента при различной температуре на его поверхности t_h . Измерения проводились на расстоянии 35, 55 и 70 мм. Далее путем аппроксимации были получены значения данных параметров для других расстояний.

Результаты калибровки приведены в табл. 1. Данные табл. 1 позволяют определять плотность теплового потока на поверхности образца горючего материала, находящегося на заданном расстоянии L , при заданной температуре t_h .

Исходные данные

В качестве горючего материала использовалась древесина хвойных пород размером 30×30×3 мм и массой $(1,23 \pm 0,02)$ г (рис. 3).

Исследование влияния условий в камере сгорания на коэффициент дымообразования проводилось при различных значениях плотности падающего теплового потока, температуры на поверхности нагревательного элемента и расстояния от его поверхности до образца.

Таблица 1. Результаты калибровки электронагревательного оборудования

Table 1. Calibration results of electrical heating equipment

$t_{\text{нр}}$, °C, на расстоянии L , мм / $t_{\text{нр}}$, °C, at distance L , mm											q , кВт/м ²
85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	q , kW/m ²
891	860	833	809	793	777	764	746	733	719	708	65
873	842	815	792	774	757	742	727	715	702	693	60
854	824	798	775	756	737	722	707	696	684	675	55
835	806	780	758	738	718	702	688	677	666	658	50
811	783	758	736	716	697	681	667	657	646	638	45
783	756	732	711	693	675	660	646	635	624	616	40
755	728	705	685	667	650	635	621	610	599	591	35
726	701	678	659	641	623	608	593	581	569	560	30
687	663	642	624	605	587	572	557	546	535	526	25
641	619	599	582	563	544	529	516	506	496	488	20
586	566	547	532	513	494	479	466	457	447	440	15
509	491	475	462	446	430	417	405	396	386	379	10
386	373	361	351	340	329	320	313	309	304	300	5

Расстояние до образца было принято равным 35, 55 и 70 мм. Плотность теплового потока была задана 25 и 35 кВт/м², а температура на поверхности нагревательного элемента экспериментальной установки изменялась от 526 до 685 °C.

При проведении испытаний и на экспериментальной установке, и на стандартизированной установке по методу ГОСТ 12.1.044–2018 размеры образцов древесины хвойных пород и их масса были идентичными. Расстояние от поверхности нагревательного элемента до поверхности образца составляло 60 мм.



Рис. 3. Образцы хвойных пород древесины для огневых испытаний

Fig. 3. Samples of coniferous woods for fire tests

Результаты экспериментов и их анализ

Вид образцов древесины до и после испытаний представлен на рис. 4.

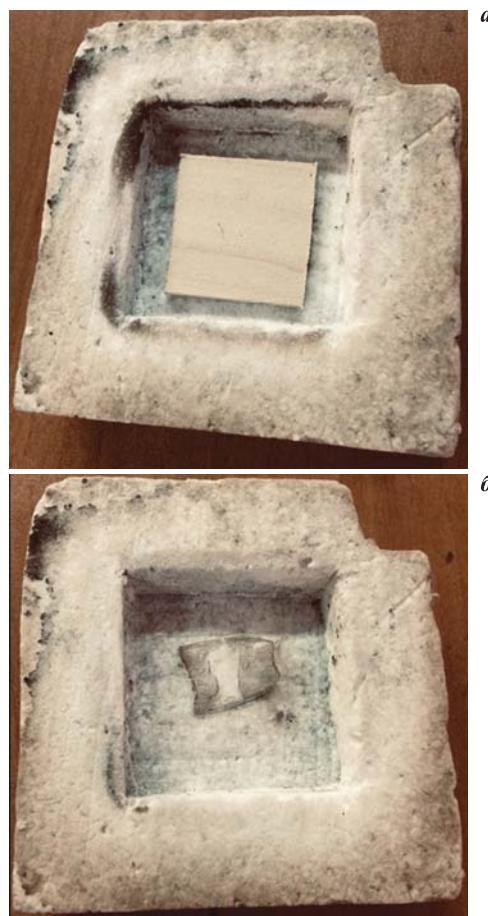


Рис. 4. Образец древесины до (а) и после (б) огневых испытаний

Fig. 4. Sample of coniferous woods before (a) and after (b) fire tests

Таблица 2. Влияние условий в камере сгорания на величину удельного коэффициента дымообразования древесины
Table 2. Influence of conditions in the combustion chamber on the value of specific smoke generation coefficient of wood

Номер эксперимента No. experiment	Режим испытания Test mode	$q, \text{kBT/m}^2$ $q, \text{kW/m}^2$	$L, \text{мм}$ L, mm	$t_h, ^\circ\text{C}$ $t_h, ^\circ\text{C}$	$t_o, ^\circ\text{C}$ $t_s, ^\circ\text{C}$	$D_m, \text{Нп}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$ $D_m, \text{Np}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$
1	Горение Combustion	35	70	685	309	56,9
2		35	70	685	309	42,8
3		35	70	685	309	44,8
4		35	55	635	282	33,6
5		35	55	635	282	29,5
6		35	55	635	282	23,2
7		35	35	591	273	22,1
8		35	35	591	273	26,4
9		35	35	591	273	30,4
10	Тление Smoldering	25	70	624	239	100,9
11		25	70	624	239	134,5
12		25	70	624	239	120,5
13		25	55	572	224	85,7
14		25	55	572	224	98,4
15		25	55	572	224	96,2
16		25	35	526	218	82,9
17		25	35	526	218	98,6
18		25	35	526	218	89,4
19*	Горение Combustion	35	60	766	—	290
20*	Тление Smoldering	35	60	766	—	775
21*	Тление Smoldering	25	60	700	—	560

* Стандартный метод испытаний по ГОСТ 12.1.044–2018.
Standard test method GOST 12.1.044–2018.

Результаты огневых испытаний показали, что в режиме пламенного горения и в режиме тления значения коэффициента дымообразования различаются и существенно меняются в зависимости от условий в камере сгорания (табл. 2 и рис. 5) (где t_o — температура поверхности образца, $^\circ\text{C}$).

Из табл. 2 видно, что значение коэффициента дымообразования существенно зависит от расстояния между поверхностями нагревательного элемента и образца, так как на различном расстоянии при одинаковой плотности теплового потока температура t_o на поверхности образца различна, что в свою очередь значительно влияет на процесс дымообразования.

Коэффициент дымообразования, полученный на модифицированной установке, изменялся от 22,1 до 56,9 Нп·м²/кг в режиме горения и от 82,9 до 134,5 Нп·м²/кг в режиме тления. Таким образом, разница в значениях коэффициента дымообразования составляла 34,8 Нп·м²/кг в режиме горения и 51,6 Нп·м²/кг в режиме тления.

Для хвойных древесных материалов интервал значений коэффициента D_m , используемый при моделировании пожаров, равен 57–61 Нп·м²/кг [19], что соизмеримо с диапазоном его изменения в проведенных экспериментах.

В связи с этим научное обоснование правильности выбора данного коэффициента играет решающую роль при расчете времени блокирования путей эвакуации по потере видимости.

Одновременно с огневыми испытаниями на модифицированной экспериментальной установке были проведены испытания на стандартизированной установке по методу ГОСТ 12.1.044–2018 (см. рис. 5).

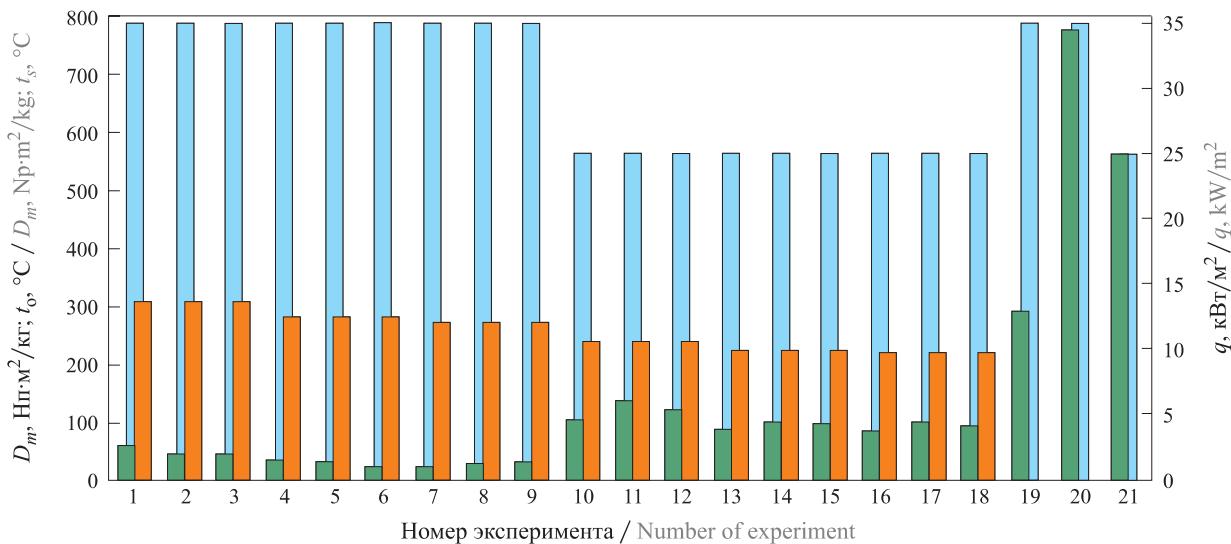


Рис. 5. Результаты огневых испытаний древесины: ■ — коэффициент дымообразования; ■ — температура на поверхности образца; ■ — плотность теплового потока на поверхности образца
Fig. 5. Results of fire tests of wood: ■ — specific smoke generation coefficient; ■ — temperature on the surface of the sample; ■ — heat flux density on the sample surface

Из рис. 5 видно, что значения коэффициента дымообразования, полученные на стандартизированной установке (эксперименты № 19–21), значительно выше полученных на модифицированной установке (эксперименты № 1–18) — на 233,1 Нп·м²/кг в режиме горения и на 640,5 Нп·м²/кг в режиме тления.

Основные отличия модифицированной установки от стандартизированной заключаются в следующем:

- в камере сгорания отсутствует искусственный источник зажигания (газовая горелка);
- электронагревательный излучатель оборудован системой водяного охлаждения;
- различаются объемы камер сгорания;
- экспозиционная камера термоизолирована в отличие от стандартизированной установки;
- образец в модифицированной установке расположен горизонтально, в стандартизированной — под углом 45°.

Вышеуказанные отличия в значениях удельного коэффициента дымообразования, полученных на раз-

ных установках, требуют проведения дальнейших исследований по влиянию конструктивных особенностей установки и условий проведения испытаний на коэффициент дымообразования.

Заключение

Конструктивные особенности экспериментальной установки и условия в камере сгорания оказывают сильное влияние на удельный коэффициент дымообразования горючего материала.

Значения коэффициента дымообразования, получаемые на модифицированной экспериментальной установке, значительно отличаются от получаемых стандартным методом.

Таким образом, для достоверного расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости необходимо проведение дальнейших исследований, позволяющих научно обосновать методику определения коэффициента дымообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абашкин А. А., Карпов А. В., Ушаков Д. В., Фомин М. В., Гилетич А. Н., Комков П. М., Самошин Д. А. Пособие по применению “Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности”. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : ВНИИПО, 2014. — 226 с.
2. Young C. J., Moss J. Smoke inhalation: Diagnosis and treatment. Journal of Clinical Anesthesia. — 1989. — Vol. 1, Issue 5. — P. 377–386. DOI: 10.1016/0952-8180(89)90079-2.
3. Shusterman D. J. Clinical smoke inhalation injury: systemic effects // Occupational Medicine. — 1993. — Vol. 8, No. 3. — P. 469–503.
4. Corches A.-M., Ulriksen L., Jomaas G. FDS Modeling of the Sensitivity of the Smoke Potential Values used in Fire Safety Strategies // Proceedings of the 10th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods (10–12 November 2014, Queensland, Australia). — Red Hook, NY : Curran Associates, Inc., 2015. — P. 346–357.
5. Gyppaz F. Smoke and safety in case of fire. — Lyon, France : Nexans Research Center, 2014. — 15 p.
6. Smoke Control Design // Performance-Based Fire Safety Design / Hurley M. J., Rosenbaum E. R. — Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. — P. 131–137. DOI: 10.1201/b18375-9.
7. Gross D., Loftus J. J., Robertson A. F. Method for measuring smoke from burning materials // Symposium on Fire Test Methods — Restraint & Smoke. — Conshohocken, PA : ASTM International, 1967. — P. 166–204. DOI: 10.1520/stp41310s.
8. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings // Applied Mechanics and Materials. — 2013. — Vol. 475–476. — P. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475–476.1344.
9. Kolodyazhniy S., Kozlov V. Analytical calculation of time of reaching specific values based on visibility loss during a fire // MATEC Web of Conferences. — 2018. — Vol. 193, Article No. 03007. — 8 p. DOI: 10.1051/matecconf/201819303007.
10. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Пер. с англ. — М. : Стройиздат, 1990. — 424 с.
11. Rasbash D. J., Drysdale D. D. Fundamentals of smoke production // Fire Safety Journal. — 1982. — Vol. 5, Issue 1. — P. 77–86. DOI: 10.1016/0379-7112(82)90008-x.
12. Orzel R. A. Toxicological aspects of firesmoke: polymer pyrolysis and combustion // Occupational Medicine. — 1993. — Vol. 8, No. 3. — P. 414–429.
13. 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.
14. Pokrovskaya E. N., Portnov F. A. Reduction of smoke-generation ability of construction timber // MATEC Web of Conferences. — 2016. — Vol. 86, Article No. 04035. — 6 p. DOI: 10.1051/matecconf/20168604035.

15. Portnov F. A. The kinetic parameters of aerosols formed during combustion of modified wood // MATEC Web of Conferences. — 2018. — Vol. 251, Article No. 02023. — 8 p. DOI: 10.1051/matecconf/201825102023.
16. Pokrovskaya E. N., Nikiforova T. P. Effect of fireprotection treatment of wood on flame spread in fire // Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting of Deflagrations : Proceedings of II International Seminar (11–15 August 1997, Moscow, Russia). — Moscow, VNIIPo Publ., 1997. — P. 739–741.
17. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Горение и пожарная опасность древесины // Пожаро-взрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2012. — Т. 21, № 1. — С. 19–32.
18. Pokrovskaya E. N., Portnov F. A. The use of thermodynamic characteristics when selecting fire retardants // MATEC Web of Conferences. — 2017. — Vol. 117, Article No. 00138. — 6 p. DOI: 10.1051/matecconf/201711700138.
19. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. — М. : Академия ГПС МВД России. — 2000. — 118 с.
20. Пузач С. В., Пузач В. Г., Доан В. М. К определению показателя токсичности продуктов горения горючих веществ и материалов в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2011. — Т. 20, № 4. — С. 4–13.

REFERENCES

1. A. A. Abashkin, A. V. Karpov, D. V. Ushakov, M. V. Fomin, A. N. Giletich, P. M. Komkov, D. A. Samoshin. *Posobiye po primeneniyu “Metodiki opredeleniya raschetnykh velichin pozharnogo riska v zdaniyakh, sooruzheniyakh i stroyeniyakh razlichnykh klassov funktsionalnoy pozharnoy opasnosti”* [Manual on the application of “Methods for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and structures of various classes of functional fire hazard”]. 2nd ed. Moscow, VNIIPo Publ., 2014. 226 p. (in Russian).
2. C. J. Young, J. Moss. Smoke inhalation: Diagnosis and treatment. *Journal of Clinical Anesthesia*, 1989, vol. 1, issue 5, pp. 377–386. DOI: 10.1016/0952-8180(89)90079-2.
3. D. J. Shusterman. Clinical smoke inhalation injury: systemic effects. *Occupational Medicine*, 1993, vol. 8, no. 3, pp. 469–503.
4. A.-M. Corches, L. Ulriksen, G. Jomaas. FDS Modeling of the Sensitivity of the Smoke Potential Values used in Fire Safety Strategies. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods (10–12 November 2014, Queensland, Australia)*. Red Hook, NY, Curran Associates, Inc., 2015, pp. 346–357.
5. F. Gyppaz. *Smoke and safety in case of fire*. Lyon, France, Nexans Research Center, 2014. 15 p.
6. Smoke Control Design. In: M. J. Hurley, E. R. Rosenbaum. *Performance-Based Fire Safety Design*. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015, pp. 131–137. DOI: 10.1201/b18375-9.
7. D. Gross, J. J. Loftus, A. F. Robertson. Method for measuring smoke from burning materials. In: *Symposium on Fire Test Methods — Restraint & Smoke*. Conshohocken, PA, ASTM International, 1967, pp. 166–204. DOI: 10.1520/STP41310s.
8. A. F. Sharovarnikov, D. A. Korolchenko. 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.
9. S. Kolodyazhniy, V. Kozlov. Analytical calculation of time of reaching specific values based on visibility loss during a fire. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 193, article no. 03007. 8 p. DOI: 10.1051/matecconf/201819303007.
10. D. D. Drayzdel. *An introduction to fire dynamics*. Chichester, John Wiley and Sons, 1985. (Russ. ed.: D. Drayzdel. *Vvedeniye v dinamiku pozharov*. Moscow, Stroyizdat, 1990. 424 p.).
11. D. J. Rasbash, D. D. Drysdale. Fundamentals of smoke production. *Fire Safety Journal*, 1982, vol. 5, issue 1, pp. 77–86. DOI: 10.1016/0379-7112(82)90008-x.
12. R. A. Orzel. Toxicological aspects of firesmoke: polymer pyrolysis and combustion. *Occupational Medicine*, 1993, vol. 8, no. 3, pp. 414–429.
13. S. V. Puzach, E. V. Suleykin. New united theoretical and experimental approach to the calculation of the distribution of toxic gases in case of fire in the room. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 2, pp. 13–20 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20.
14. E. N. Pokrovskaya, F. A. Portnov. Reduction of smoke-generation ability of construction timber. *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 86, article no. 04035. 6 p. DOI: 10.1051/matecconf/20168604035.
15. F. A. Portnov. The kinetic parameters of aerosols formed during combustion of modified wood. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 251, article no. 02023. 8 p. DOI: 10.1051/matecconf/2018251020233.

16. E. N. Pokrovskaya, T. P. Nikiforova. Effect of fireprotection treatment of wood on flame spread in fire. In: *Fire-and-Explosion Hazard of Substances and Venting of Deflagrations. Proceedings of II International Seminar (11–15 August 1997, Moscow, Russia)*. Moscow, VNIPO Publ., 1997, pp. 739–741.
17. R. M. Aseeva, B. B. Serkov, A. B. Sivenkov. Combustion and fire safety of wooden materials. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 1, pp. 19–32 (in Russian).
18. E. N. Pokrovskaya, F. A. Portnov. The use of thermodynamic characteristics when selecting fire retardants. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 117, article no. 00138. 6 p. DOI: 10.1051/matecconf/201711700138.
19. Yu. A. Koshmarov. *Prognozirovaniye opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii* [The prediction of dangerous fire factors in the room]. Moscow, State Fire Academy of Ministry of Internal Affairs of Russia Publ., 2000. 118 p. (in Russian).
20. S. V. Puzach, V. G. Puzach, V. M. Doan. To definition of toxic potency of combustion products of combustible materials in compartment. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 4, pp. 4–13 (in Russian).

Поступила 20.09.2019, после доработки 25.10.2019;

принята к публикации 03.12.2019

Received 20 September 2019; Received in revised form 25 October 2019;

Accepted 3 December 2019

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 МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; Author ID: 7003537835; Researcher ID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: pzachsv@mail.ru

МУСТАФИН Валихан Мухтарович, преподаватель кафедры оперативно-тактических дисциплин, Kokshetau Technical Institute of the Committee for Emergency Situations of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan, Kokshetau, Kazakhstan; адъюнкт, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-8391-7241; e-mail: GeneralPK@bk.ru

АКПЕРОВ Руслан Гянджавиевич, канд. техн. наук, преподаватель кафедры пожарной безопасности в строительстве, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru

Information about the authors

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Head of Thermal Physics and Hydraulic Department, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; Author ID: 7003537835; Researcher ID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Valikhan M. MUSTAFIN, Lecturer of Operational and Tactical Disciplines Department, Kokshetau Technical Institute of the Committee for Emergency Situations of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan, Kokshetau, Kazakhstan; Postgraduate Student, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8391-7241; e-mail: GeneralPK@bk.ru

Ruslan G. AKPEROV, Cand. Sci. (Eng.), Lecturer of Fire Safety in Building Department, State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2524-8710; e-mail: akperov01@mail.ru