

Численное моделирование задымления помещений при пожаре с учетом различных типов пожарной нагрузки

Сергей Викторович Пузач, Сергей Петрович Калмыков ✉

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Согласно действующим методическим рекомендациям в области проектирования и расчета параметров систем противодымной защиты зданий и сооружений как в России, так и других странах для определения расхода выделяющегося при пожаре дыма в помещениях, который необходимо удалять системами вытяжной противодымной вентиляции, применяются зависимости, основанные на тепловой мощности очага пожара. На процесс задымления помещения и его скорость при пожаре, кроме низшей теплоты сгорания и удельной скорости выгорания, могут повлиять такие характеристики пожарной нагрузки, как дымообразующая способность, выход токсичных продуктов горения и т.п.

Цели и задачи. Целью работы является проверка предположения о влиянии характеристик пожарной нагрузки, не входящих в величину тепловой мощности очага пожара, на процесс задымления помещения.

Методы исследования. Для оценки задымленности помещений при пожаре с учетом различных типов пожарной нагрузки применялись методы компьютерного моделирования при помощи программного комплекса Fire Dynamics Simulator.

Результаты и их обсуждение. Представлены результаты моделирования динамики дальности видимости, температуры и плотности дыма в помещениях площадью 100 и 200 м² при пожаре с учетом различных типов пожарной нагрузки, участвующей в горении.

Выводы. Качественные отличия времени от начала пожара до потери видимости, динамики оптической плотности дымогазовоздушной среды, а также отличия площади задымления помещений свидетельствуют о существенной дифференцированности процесса задымления помещений в зависимости от свойств горючей нагрузки, участвующей в пожаре.

Выявленное влияние характеристик пожарной нагрузки, не входящих в величину тепловой мощности очага пожара, на процесс задымления помещения требует проведения дополнительных исследований по оценке эффективности работы систем дымоудаления из помещений с учетом результатов, полученных в настоящей статье.

Ключевые слова: дым; оптическая плотность дыма; опасные факторы пожара; дальность видимости; расход дыма; противодымная вентиляция

Для цитирования: Пузач С.В., Калмыков С.П. Численное моделирование задымления помещений при пожаре с учетом различных типов пожарной нагрузки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 2. С. 42–49. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.42-49

✉ Калмыков Сергей Петрович, e-mail: k_sp@bk.ru

Numerical modelling of smoke condition of premises in case of fire taking into account different types of fire load

Sergey V. Puzach, Sergey P. Kalmykov ✉

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

ABSTRACT

Introduction. According to the current methodological recommendations in the field of design and calculation of parameters of smoke protection systems for buildings and structures, both in Russia and other countries, to determine the flow rate of smoke emitted during a fire in the premises, which must be removed by exhaust smoke ventilation systems, dependencies based on the thermal power of the fireplace are used. The process of smoke formation in a room and its rate during a fire, in addition to the lower calorific value and specific burnout rate, can be affected by such characteristics of the fire load as smoke-forming ability, the release of toxic combustion products, etc.

Goals and objectives. The purpose of the work is to verify the assumption about the influence of fire load characteristics, which are not included in the value of the thermal power of the fire centre, on the process of smoke formation in the room.

Research methods. To assess the smoke content of premises during a fire, taking into account various types of fire load, computer modelling methods were used using the Fire Dynamics Simulator software package.

Results and its discussion. The results of modelling the dynamics of temperature, density and smoke visibility in rooms with an area of 100 and 200 m² during a fire are presented, taking into account various types of fire load involved in combustion.

Conclusions. Qualitative differences in the time from the beginning of the fire to the loss of visibility, the dynamics of the optical density of the smoke-gas-air environment, as well as differences in the area of smoke in the premises indicate a significant differentiation of the process of smoke in the premises depending on the properties of the combustible load involved in the fire.

The identified influence of the characteristics of the fire load, which are not included in the thermal power of the fire source, on the process of smoke formation in the premises requires additional research to assess the efficiency of smoke removal systems from the premises, taking into account the results obtained in this paper.

Keywords: smoke; smoke optical density; fire hazards; smoke visibility; smoke flow rate; smoke ventilation

For citation: Puzach S.V., Kalmykov S.P. Numerical modelling of smoke condition of premises in case of fire taking into account different types of fire load. *Pozharovzrybobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(2):42-49. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.02.42-49 (rus).

✉ Sergey Petrovich Kalmykov, e-mail: k_sp@bk.ru

Введение

«К опасным факторам пожара (далее – ОФП), воздействующим на людей и имущество, относятся:

- 1) пламя и искры;
- 2) тепловой поток;
- 3) повышенная температура окружающей среды [1, 2];
- 4) повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения [3–5];
- 5) пониженная концентрация кислорода [6, 7];
- 6) снижение видимости в дыму»¹.

Дым представляет собой совокупность следующих компонентов [1, 3]:

- частично или полностью окисленные продукты термического разложения [8–10];
- сконденсированные жидкие частицы;
- нагретый воздух, вовлекаемый восходящей конвективной колонкой очага горения.

Таким образом к дыму можно отнести 4 из 6 опасных факторов пожара.

Согласно действующим методическим рекомендациям^{2, 3} в области проектирования и расчета параметров систем противодымной защиты зданий и сооружений [3, 11] как в России, так и других странах⁴ [12] для определения расхода выделяющегося при пожаре дыма в помещениях [11–13], который

необходимо удалять системами вытяжной противодымной вентиляции, применяется формула (1), основанная на тепловой мощности очага пожара:

$$G_k = 0,032 Q_k^{3/2} Z, \quad (1)$$

где G_k — массовый расход продуктов горения, поступающих с конвективной струей в подпотолочный слой, кг/с;

Q_k — конвективная составляющая мощности очага пожара, кВт [14, 15];

Z — высота незадымленной зоны, м.

Использование подобной формулы справедливо в случае расположения очага пожара на полу помещения и попадания пламени очага пожара в область подпотолочного слоя дыма. Для расчета расхода удаляемого дыма из помещений достаточно большой высоты, таких как многосветные пространства, атриумы, пассажи, зальные помещения, применяется формула³:

$$G_k = 0,071 Q_k^{1/3} Z^{5/3} + 0,0018 Q_k. \quad (2)$$

Кроме того, применяются другие формулы для случаев расположения очага пожара на полу под навесом или балконом или задымления помещения через проем в ограждающих конструкциях.

Конвективная составляющая мощности очага пожара (часть тепловыделения пожара, идущая на нагрев продуктов горения) определяется по формуле^{3, 4}:

$$Q_k = (1 - \varphi) \eta Q_p \psi_{уд} F_r, \quad (3)$$

где φ — доля теплоты, отдаваемой очагом пожара ограждающим конструкциям;

η — коэффициент полноты сгорания;

Q_p — низшая теплота сгорания, кДж/кг;

¹ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (дата обращения: 03.10.2023).

² Расчетное определение основных параметров противодымной вентиляции зданий : метод. рекомендации к СП 7.13130.2013. М. : ВНИИПО, 2013. 58 с.

³ Расчет параметров систем противодымной защиты жилых и общественных зданий : рекомендации. М. : НП АВОК, 2018.

⁴ NFPA 92. Standard for Smoke Control Systems, 2021 Edition. Quincy, MA : NFPA, 2020. 92 p.

$\Psi_{уд}$ — удельная скорость выгорания, кг/(м²·с);

F_r — площадь очага пожара, м².

Если не принимать во внимание площадь очага пожара и ее изменение во времени, которые при проектировании систем противодымной защиты принимаются фиксированными, то на возможную скорость задымления помещения при пожаре, кроме низшей теплоты сгорания и удельной скорости выгорания, могут повлиять такие характеристики пожарной нагрузки, как дымообразующая способность, выход токсичных продуктов горения и т.п. Подобные характеристики приводятся в различных базах данных пожарной нагрузки, в частности [16].

Хотелось бы отметить, что в ранее действующих расчетных рекомендациях [1, 17, 18] массовый расход дыма определялся на основании только периметра очага пожара. Например, по формуле:

$$G = 676,8 P_{\Pi} y^{1,5} K_{ec}, \quad (4)$$

где G — массовый расход дыма, кг/ч;

P_{Π} — периметр очага пожара, м;

y — расстояние от пола до рассматриваемого уровня, м;

K_{ec} — безразмерный коэффициент.

А в еще более ранних источниках⁵ расход дыма вообще принимался исходя из площади пола помещения.

Целью работы является проверка предположения о влиянии характеристик пожарной нагрузки, не входящих в величину тепловой мощности очага пожара, на процесс задымления помещения.

Постановка задачи исследования

Исследование производилось на основе численных экспериментов, а в качестве инструмента был выбран программный комплекс Fire Dynamics Simulator [19, 20], наиболее применяемый и распространенный в России для моделирования пожаров в помещениях.

Численные эксперименты в помещениях различного назначения проводились при условии одинаковой величины конвективной составляющей мощности очага пожара, которая составляла 1 МВт. Относительное отклонение для различных сценариев составляло не более 2 %.

Подобная постановка задачи с точки зрения проектирования противодымной защиты означала абсолютно идентичные условия работы таких систем, т.е. массовый расход удаляемых продуктов горения при пожаре, закладываемый проектировщиками, для всех рассматриваемых сценариев был бы одинаков.

Рассматривался процесс задымления в помещениях высотой 3 м и площадью 100 и 200 м². В качестве пожарной нагрузки было выбрано 14 вариантов [16]:

- сценарий № 1 — здания I–II степени огнестойкости; мебель + бытовые изделия;
- сценарий № 2 — здание I–II степени огнестойкости; мебель + ткани;
- сценарий № 3 — здание I степени огнестойкости; мебель + ткани (0,75 + 0,25);
- сценарий № 4 — здание III степени огнестойкости; мебель + ткани (0,75 + 0,25);
- сценарий № 5 — кабинет; мебель + бумага (0,75 + 0,25);
- сценарий № 6 — помещение, облицованное панелями; панели ДВП;
- сценарий № 7 — административное помещение; мебель + бумага (0,75 + 0,25);
- сценарий № 8 — общественные здания; мебель + линолеум ПВХ (0,9 + 0,1);
- сценарий № 9 — библиотеки, архивы; книги, журналы на стеллажах;
- сценарий № 10 — окрашенные полы, стены; дерево + краска РХО (0,9 + 0,1);
- сценарий № 11 — выставочный зал, мастерская; дерево + ткани + краски (0,9 + 0,09 + 0,01);
- сценарий № 12 — зал; 0,5*ДВП + 0,1 (ткань, искусственная кожа ПВХ, ППУ) + 0,2*дерево с покрытием;
- сценарий № 13 — отделка: ковровин;
- сценарий № 14 — мебель + бумага (0,8) + ковровое покрытие (0,2).

С учетом различных типов пожарной нагрузки и площади помещения было проведено 28 численных экспериментов.

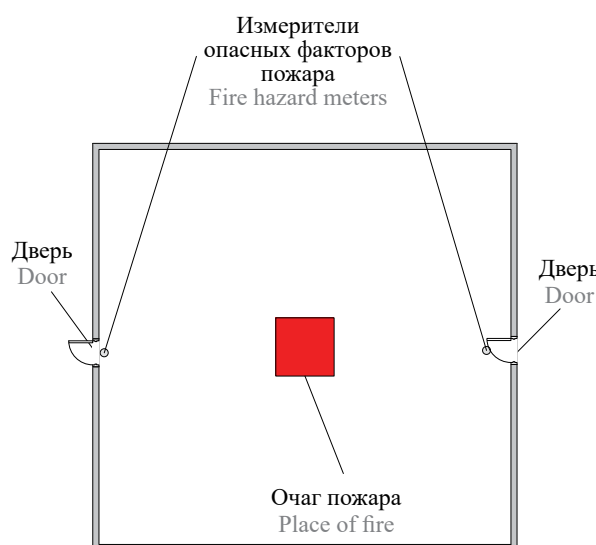


Рис. 1. Схема моделируемого помещения
Fig. 1. Scheme of the modelled room

⁵ СНиП II-90–81. Производственные здания промышленных предприятий. М., 1982. 14 с.

Очаг пожара располагался в центре помещения и задавался через граничные условия на поверхности как «вентиляционное отверстие». Характеристики пожарной нагрузки принимались по типовой базе горючей нагрузки [16]. В численных экспериментах учитывалась линейная скорость распространения пламени по поверхности очага пожара.

Максимальная площадь очага пожара ограничивались для того, чтобы пиковая мощность тепловыделения во всех сценариях была одинаковой. Расчетная сетка принималась кубической формы с длиной стороны, равной 0,01 м.

На рис. 1 показана схема помещения, в котором моделировался очаг пожара.

В помещении предусмотрены два открытых дверных проема размерами 1×2 м. Перед выходом из помещения в дверных проемах установлены измерители ОФП на высоте 1,7 м.

Результаты исследования

Задымленность помещения оценивалась на основании полей дальности видимости и оптической плотности дымогазовоздушной среды, а также времени от начала пожара до потери видимости в контрольных точках, расположенных вблизи выходов из помещения (рис. 1). Предельно допустимая дальность видимости определялась исходя из эффективного диаметра помещения⁶.

На рис. 2–7 показаны результаты численного моделирования для сценариев № 1, 6 и 9, а именно: поля дальности видимости (см. рис. 2–4) в помещении площадью 100 м^2 на момент времени 50 с

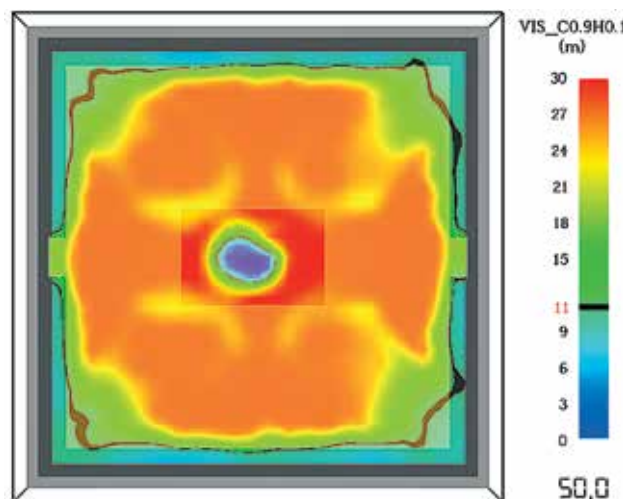


Рис. 2. Поле дальности видимости — сценарий № 1
Fig. 2. Smoke visibility field — Scenario 1

⁶ 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. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406477165/> (дата обращения: 03.10.2023).

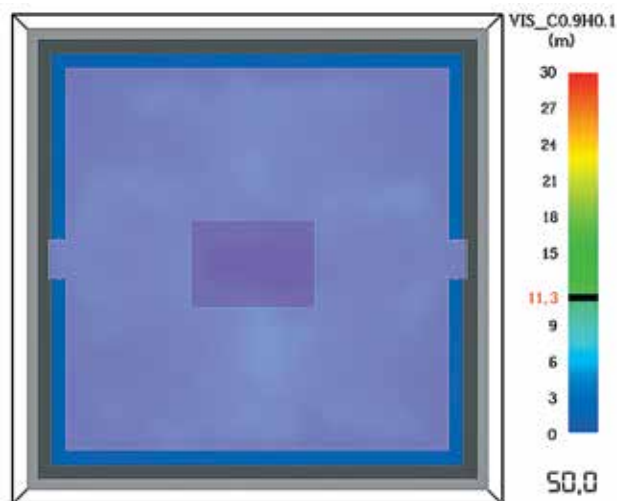


Рис. 3. Поле дальности видимости — сценарий № 6
Fig. 3. Smoke visibility field — Scenario 6

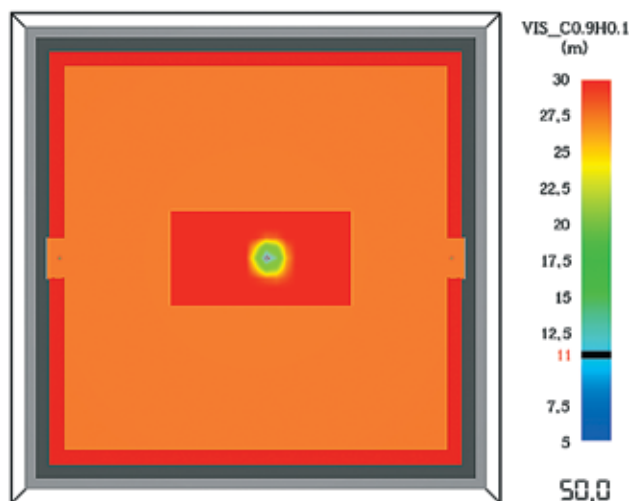


Рис. 4. Поле дальности видимости — сценарий № 9
Fig. 4. Smoke visibility field — Scenario 9

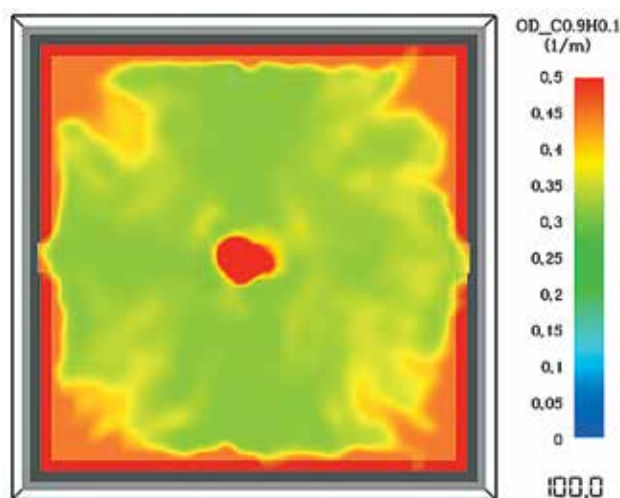


Рис. 5. Поле оптической плотности дымогазовоздушной среды — сценарий № 1
Fig. 5. Smoke optical density field — Scenario 1

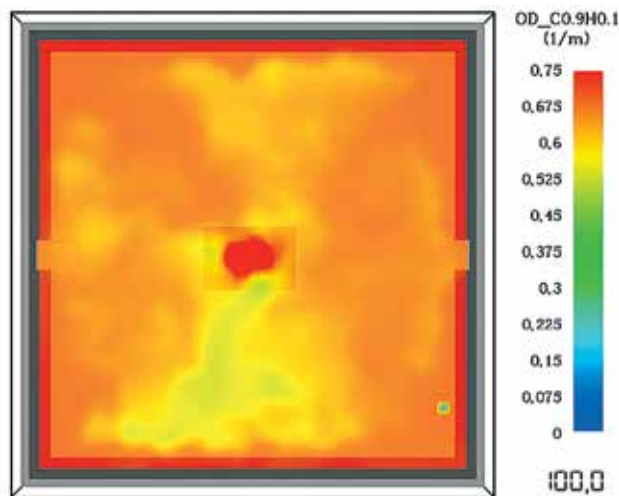


Рис. 6. Поле оптической плотности дымогазовоздушной среды — сценарий № 6
Fig. 6. Smoke optical density field — Scenario 6

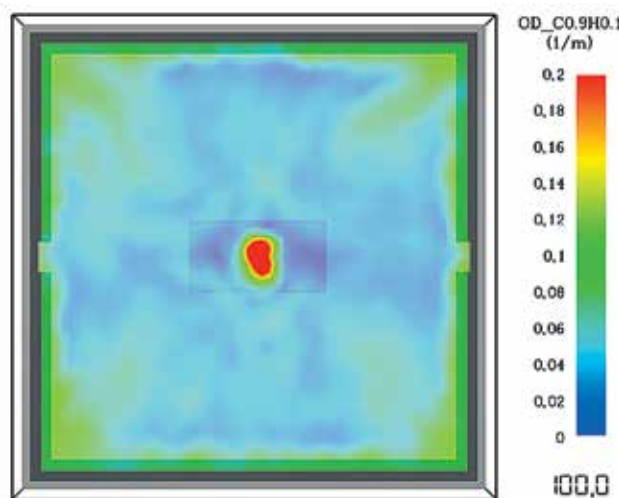


Рис. 7. Поле оптической плотности дымогазовоздушной среды — сценарий № 9
Fig. 7. Smoke optical density field — Scenario 9

от начала пожара и оптической плотности дымогазовоздушной среды (см. рис. 5–7) в помещении площадью 200 м² на момент времени 100 с от начала пожара на уровне 1,7 м от пола помещения. Изменение дальности видимости в контрольных точках перед выходом из помещения в сценариях № 1, 6 и 9 показано на рис. 8 и 9.

Время наступления критического значения ОФП по потере видимости по 28 рассматриваемым сценариям приведено в таблице.

Анализ полученных данных по задымленности помещений, основанных на изменении дальности видимости и оптической плотности дымогазовоздушной среды, а также времени от начала пожара до потери видимости, позволил установить существенное различие этого процесса в рассматриваемых сценариях численных экспериментов. Так, время по потере видимости для сценариев № 6 и 9 отличается более чем

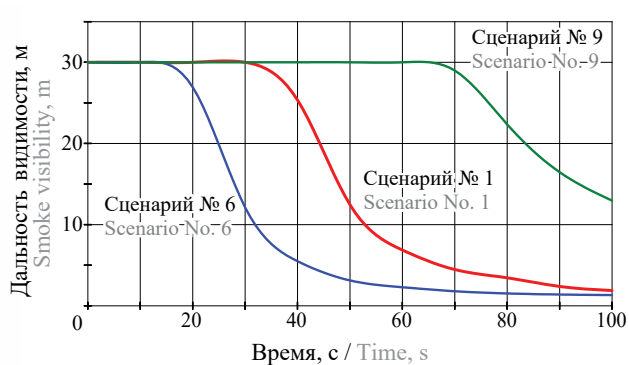


Рис. 8. Изменение дальности видимости в контрольных точках перед выходом из помещения площадью 100 м²
Fig. 8. Changing the visibility range at control points before leaving a room with an area of 100 м²

Результаты численного моделирования
 Numerical simulation results

Номер сценария Scenario number	Время от начала пожара до потери видимости в дыму, с Time from the start of the fire to loss of visibility in the smoke, s	
	Площадь помещения 100 м ² Room area 100 м ²	Площадь помещения 200 м ² Room area 200 м ²
1	46,4	47,9
2	68,3	66,7
3	69,6	77,2
4	29,1	26,4
5	35,8	39,1
6	23,4	25,6
7	44,7	47,6
8	73,1	77,1
9	95,1	103,1
10	55,9	56,6
11	63,7	58,6
12	27,6	29,9
13	37,0	35,7
14	32,4	38,4

в 4 раза. Это также наблюдается на картине процесса задымления в этих сценариях. Например, в сценарии № 9 на момент времени 50 с от начала пожара (рис. 4) дальность видимости во всем помещении соответствует начальной. В сценарии № 1 в части помещения к этому же времени уже произошло опускание дымового слоя ниже уровня 1,7 м (см. рис. 2). А в сценарии № 6 (см. рис. 3) дымом полностью заполнена вся верхняя часть помещения.

Кроме того, для определения производительности вентиляционного оборудования систем вытяжной противодымной вентиляции необходимо знать величину объемного расхода удаляемого (выделяющегося) при пожаре дыма.

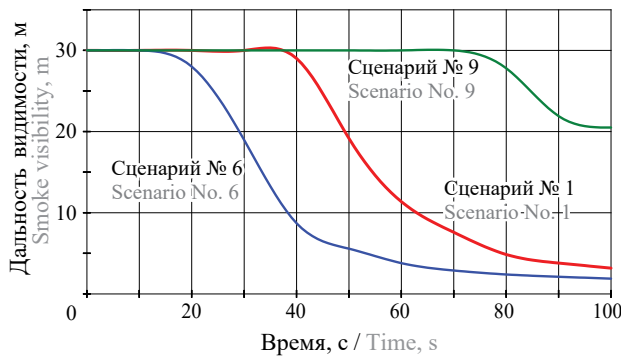


Рис. 9. Изменение дальности видимости в контрольных точках перед выходом из помещения площадью 200 м²

Fig. 9. Changing the visibility range at control points before leaving a room with an area of 200 m²

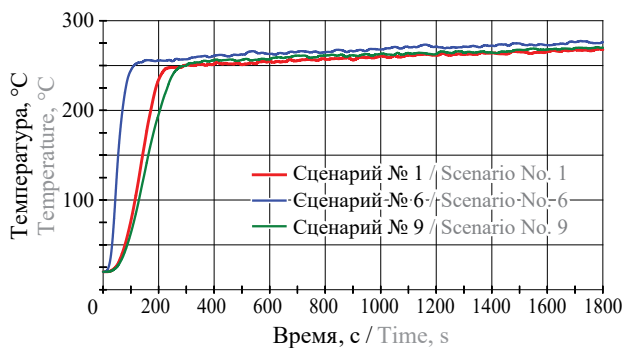


Рис. 10. Изменение среднеобъемной температуры дымового слоя в помещении площадью 100 м²

Fig. 10. Change in the average volumetric temperature of the smoke layer in a room with an area of 100 m²

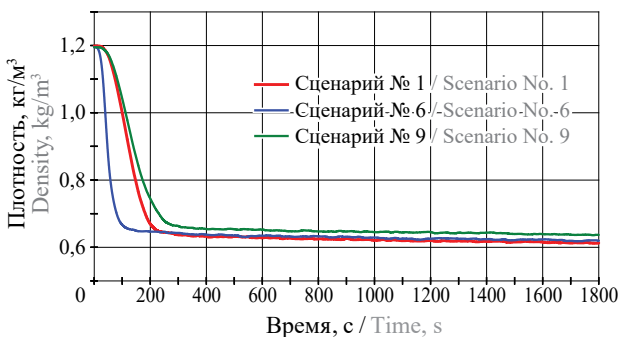


Рис. 11. Изменение среднеобъемной плотности дымового слоя в помещении площадью 100 м²

Fig. 11. Change in the average volume density of the smoke layer in a room with an area of 100 m²

Объемный расход дыма рассчитывается исходя из величины массового расхода дыма и его температуры. Так как массовый расход удаляемых продуктов горения при пожаре, рассчитываемый по современным рекомендациям, для всех рассматриваемых сценариев был одинаков, основываясь на разном значении тепловой мощности очага пожара, то для оценки объемного расхода дыма необходимо знать температуру или плотность дыма.

Изменение среднеобъемной температуры и плотности дымовоздушной смеси в подпотолочном

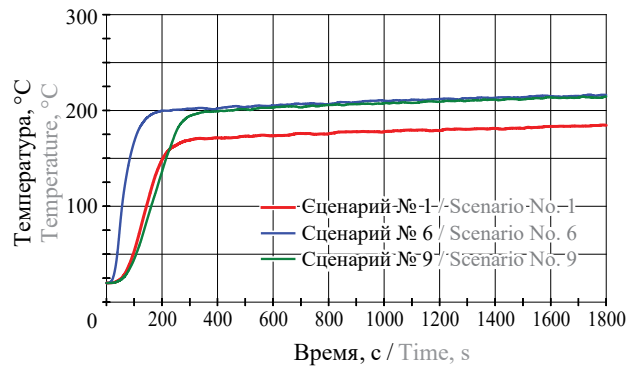


Рис. 12. Изменение среднеобъемной температуры дымового слоя в помещении площадью 200 м²

Fig. 12. Change in the average volumetric temperature of the smoke layer in a room with an area of 200 m²

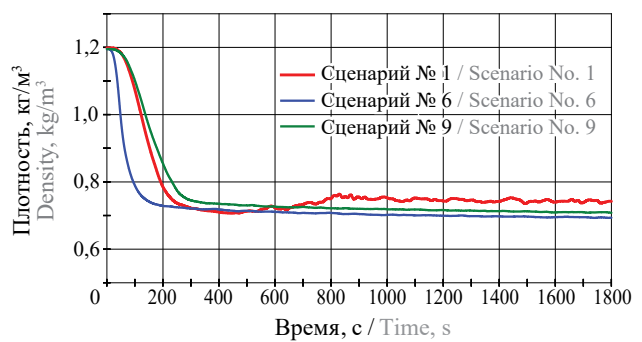


Рис. 13. Изменение среднеобъемной плотности дымового слоя в помещении площадью 200 м²

Fig. 13. Change in the average volume density of the smoke layer in a room with an area of 200 m²

пространстве от уровня 1,7 м до перекрытия представлено на рис. 10–13.

Выводы

Качественные отличия времени от начала пожара до потери видимости, динамики оптической плотности дымовоздушной среды, а также отличия площади задымления помещений свидетельствуют о существенной дифференцированности процесса задымления помещений в зависимости от свойств горючей нагрузки, участвующей в пожаре.

Как упоминалось выше, с точки зрения современного проектирования систем противодымной защиты все рассматриваемые сценарии абсолютно идентичны. Выявленное влияние характеристик пожарной нагрузки, не входящих в величину тепловой мощности очага пожара, на процесс задымления помещения указывает на возможную корректировку подхода, заложенного в основу определения расхода выделяющегося и удаляемого дыма при пожаре в помещении, и требует проведения дополнительных исследований по оценке эффективности работы систем дымоудаления из помещений с учетом результатов, полученных в настоящей статье.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Батчер Е., Парнэлл А. Опасность дыма и дымозащита / пер. с англ. Е.Ш. Фельдмана. М. : Стройиздат, 1983. 153 с.
2. Klote J.H., Milke J.A. Principles of smoke management // American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers & Society of Fire Protection Engineers. Atlanta, 2002.
3. Есин В.М., Калмыков С.П., Панов М.В., Токарев В.Н. Пожарная безопасность в строительстве : уч., в 2 ч. Часть 1. М. : Академия ГПС МЧС России, 2023. 333 с.
4. Пузач С.В., Комаревцев Н.В. Определение уровня токсичности продуктов горения веществ и материалов при пожаре с точки зрения блокирования пути эвакуации // Ройтмановские чтения : сб. мат. XI науч.-практ. конф. г. Москва, 21 марта 2023 г. М. : Академия ГПС МЧС России, 2023. С. 43–46.
5. 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 (230). С. 17–22.
6. Багажков И.В., Коноваленко П.Н., Наумов А.В. Дым и его токсичность // Актуальные вопросы естествознания : мат. V Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иваново, 24 марта 2020 года. Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. С. 13–16.
7. Purser D.A. Toxic combustion product yields as a function of equivalence ratio and flame retardants in under-ventilated fires: bench-large-scale comparisons // Polymers. 2016. Vol. 8 (9). P. 330. DOI: 10.3390/POLYM8090330
8. Su L.-C., Wu X., Zhang X., Huang X. Smart performance-based design for building fire safety: Prediction of smoke motion via AI // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 43 (4). DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102529
9. Khan M.M., Chaos M. Combustion characteristics of materials and generation of fire products. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed. 2016. Pp. 1143–1232. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_36
10. Cheung W.T., Zeng Ya., Lin Sh., Huang X. Modelling carbon monoxide transport and hazard from smouldering for building fire safety design analysis // Fire Safety Journal. August 2023. Vol. 140. P. 103895. DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.103895
11. Есин В.М., Калмыков С.П. Обоснование расхода удаляемого из поэтажных коридоров дыма при пожаре в зданиях повышенной этажности // Пожарная безопасность. 2022. № 3 (108). С. 76–85. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2022.46.16.009
12. Klote J.H., Milke J.A., Turnbull P.G., Kashef A., Ferreira M.J. Handbook of smoke control engineering. ASHRAE, 2012. 512 p.
13. Li L., Du F., Yang Y., Wei L., Huang F., Gao Z. et al. Research on the smoke mass flow rate in one-dimensional spreading stage in tunnel with multiple fire sources // Case Studies in Thermal Engineering. 2022. Vol. 31. P. 101801. DOI: 10.1016/j.csite.2022.101801
14. Veloo P., Quintiere J.G. Convective heat transfer coefficient in compartment fires // Journal of Fire Sciences. 2013. Vol. 31 (5). Pp. 410–423. DOI: 10.1177/0734904113479001
15. Mvogo P.O., Samedi O.Z., Changement P., Zaida J.T., Nzie W., Fouda H.E. et al. Investigative Study on Convective Heat Transfer inside Compartment during Fire Situation // Journal of Combustion. 2022. Vol. 2022. 12 p. DOI: 10.1155/2022/6559812
16. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учеб. пособие. М. : Академия ГПС МВД РФ, 2000. 119 с.
17. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / пер. с англ. К.Г. Бомштейна ; под ред. Ю.А. Кошмарова, В.Е. Макарова. М. : Стройиздат, 1990. 424 с.
18. Баркалов Б.В. Основания норм проектирования аварийной противодымной вентиляции // Водоснабжение и санитарная техника. 1990. № 9.
19. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., McDermott R., Vanella M. NIST Special Publication 1018-1. 6th ed. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide / Ed. Kevin McGrattan. 2021. Vol. 1. DOI: 10.6028/NIST.SP.1018
20. McGrattan K., McDermott R., Floyd J. A simple two-step reaction scheme for soot and CO // Proceedings of the Tenth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH10). Oslo, NO. 2022.

REFERENCES

1. Batchner E., Parnell A. *Smoke hazards and smoke protection*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983; 153. (rus).
2. Klote J.H., Milke J.A. Principles of Smoke Management. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers & Society of Fire Protection Engineers*. Atlanta, 2002.
3. Esin V.M., Kalmykov S.P., Panov M.V., Tokarev V.N. *Fire safety in construction : textbook*. In two parts. Part 1. Moscow, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia Publ., 2023; 333. (rus).
4. Puzach S.V., Komarevtsev N.V. Determination of the level of toxicity of combustion products of substances and materials during a fire from the point of view of blocking the escape route. *Roitman readings : collection of materials of the XI scientific and practical conference, Moscow, 21 March 2023*. Moscow, Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia Publ., 2023; 43–46 (rus).
5. Mustafin V.M., Puzach S.V. The influence of initial illumination and smoke-forming ability on the estimated time of blocking evacuation routes due to loss of visibility. *Life Safety*. 2020; 2(230):17–22. (rus).

6. Bagazhkov I.V., Konovalenko P.N., Naumov A.V. Smoke and its toxicity. *Current issues in natural science : proceedings of the V All-Russian scientific and practical conference with international participation, Ivanovo, March 24, 2020 of the year*. Ivanovo, Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2020; 13-16. (rus).
7. Purser D.A. Toxic combustion product yields as a function of equivalence ratio and flame retardants in under-ventilated fires: Bench-large-scale comparisons. *Polymers*. 2016; 8(9):330. DOI: 10.3390/POLYM8090330
8. Su L.-C., Wu X., Zhang X., Huang X. Smart performance-based design for building fire safety: Prediction of smoke motion via AI. *Journal of Building Engineering*. 2021; 43(4):102529. DOI: 10.1016/j.jobee.2021.102529
9. Khan M.M., Chaos M. Combustion characteristics of materials and generation of fire products. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed.* 2016; 1143-1232. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_36/FIGURES/27
10. Cheung W.T., Zeng Ya., Lin Sh., Huang X. Modelling carbon monoxide transport and hazard from smouldering for building fire safety design analysis. *Fire Safety Journal*. 2023; 140:103895. DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.103895
11. Esin V.M., Kalmykov S.P. Justification of the smoke consumption removed from the floor corridors during a fire in high-rise buildings. *Fire Safety*. 2022; 3(108):76-85. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2022.46.16.009 (rus).
12. Klotz J.H., Milke J.A., Turnbull P.G., Kashef A., Ferreira M.J. *Handbook of Smoke Control Engineering*. ASHRAE, 2012; 512.
13. Li L., Du F., Yang Y., Wei L., Huang F., Gao Z. et al. *Research on the smoke mass flow rate in one-dimensional spreading stage in tunnel with multiple fire sources*. 2022; 31:101801. DOI: 10.1016/j.csite.2022.101801
14. Veloo P., Quintiere J.G. Convective heat transfer coefficient in compartment fires. *Journal of Fire Sciences*. 2013; 31(5):410-423. DOI: 10.1177/0734904113479001
15. Mvogo P.O., Samedi O.Z., Chagement P., Zaida J.T., Nzie W., Fouda H.E. et al. Investigative study on convective heat transfer inside compartment during fire situation. *Journal of Combustion*. 2022; 2022:12. DOI: 10.1155/2022/6559812
16. Koshmarov Yu.A. *Modeling and analysis of human movements in various buildings : schoolbook*. Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2000; 119. (rus).
17. Drysdale D. *Introduction to the dynamics of fires*. Translated from the English by K.G. Bomstein; by Yu.A. Koshmarov, V.E. Makarov (Ed.). Moscow, Stroyizdat Publ., 1990; 424. (rus).
18. Barkalov B.V. Basis of design standards for emergency smoke ventilation. *Water supply and sanitary technology*. 1990; 9. (rus).
19. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., McDermott R., Vanella M. *NIST Special Publication 1018-1. 6th Edition. Fire Dynamics Simulator: Technical Reference Guide*. Kevin McGrattan (Ed.). 2021; 1. DOI: 10.6028/NIST.SP.1018
20. McGrattan K., McDermott R., Floyd J. A simple two-step reaction scheme for soot and CO. *Proceedings of the Tenth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH10)*. Oslo, NO. 2022.

Поступила 25.12.2023, после доработки 15.02.2024;

принята к публикации 29.02.2024

Received December 25, 2023; Received in revised form February 15, 2024;

Accepted February 29, 2024

Информация об авторах

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой 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; Scopus AuthorID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

КАЛМЫКОВ Сергей Петрович, канд. техн. наук, доцент кафедры пожарной безопасности в строительстве, 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; РИНЦ ID: 758175; ResearcherID: B-5446-2016; ORCID: 0000-0002-3444-086X; e-mail: k_sp@bk.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, the 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, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; Scopus AuthorID: 7003537835; ResearcherID: U-2907-2019; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Sergey P. KALMYKOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Fire Safety in Construction 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; ResearcherID: B-5446-2016; ID RISC: 758175; ORCID: 0000-0002-3444-086X; e-mail: k_sp@bk.ru

Contributions by authors: all authors made equivalent contributions to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.