

Моделирование теплового воздействия пожаров в зданиях из деревянных конструкций на соседние объекты

Ирек Равильевич Хасанов✉, Станислав Анатольевич Зуев,
Александр Анатольевич Абашкин

Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При проектировании и строительстве деревянных зданий нормативными документами предусмотрен ряд ограничений, обусловленных их низкой устойчивостью при пожаре. Противопожарные разрывы (расстояния) для таких зданий максимальны, а увеличение их этажности приведет к их дополнительному увеличению. В связи с этим представляется обоснованным проведение исследований в части оценки оптимальных противопожарных разрывов для ограничения распространения пожара в деревянных зданиях на соседние объекты.

Цели и задачи. Целью настоящей работы является изучение путем полевого моделирования особенностей поведения при пожаре деревянных конструкций для определения количественных характеристик тепловых потоков на соседние объекты защиты для выбора безопасных противопожарных расстояний.

Методология исследования. Для достижения цели исследования использовалось полевое моделирование динамики пожара с использованием компьютерного программного комплекса FDS. При моделировании получены значения температур и тепловых потоков на соседние объекты от пожаров в деревянных зданиях.

Результаты и их обсуждение. В результате моделирования развития пожара в деревянных зданиях различной этажности были получены значения интенсивности теплового излучения на соседние объекты, в том числе с учетом ветровой нагрузки. Результаты расчетов позволили разработать предложения по применению полученных данных при разработке обоснованных нормативных требований пожарной безопасности.

Заключение. Показано, что при пожарах в зданиях с конструкциями из незащищенной древесины при повышении этажности наблюдается рост теплового воздействия на соседние объекты. При наличии ветра в направлении соседнего объекта тепловое воздействие также увеличивается. При оценке безопасных расстояний следует учитывать возможность совместного воздействия лучистого и конвективного потоков. Для соблюдения действующих нормативных значений противопожарных расстояний необходимо повышение пожарной устойчивости деревянных зданий путем увеличения пределов огнестойкости и снижения классов пожарной опасности несущих и ограждающих строительных конструкций.

Ключевые слова: деревянные здания; деревянные конструкции; полевое моделирование пожара; противопожарный разрыв; тепловой поток; распространение пожара

Для цитирования: Хасанов И.Р., Зуев С.А., Абашкин А.А. Моделирование теплового воздействия пожаров в зданиях из деревянных конструкций на соседние объекты // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 6. С. 48–55. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.48-55

✉ Хасанов Ирек Равильевич, e-mail: irhas@rambler.ru

Modelling of thermal effects of fires in buildings made of wooden structures on neighbouring objects

Irek R. Khasanov✉, Stanislav A. Zuev, Aleksandr A. Abashkin

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When designing and constructing wooden buildings, regulatory documents stipulate a number of restrictions due to their low fire resistance. Fire breaks (distances) for such buildings are maximum, and an increase in their number of floors will lead to their additional increase. In this regard, it seems reasonable to conduct research in terms of assessing the optimal fire breaks to limit the spread of fire in wooden buildings to neighbouring facilities.

Aims and objectives. The aim of this work is to study by field modelling the peculiarities of fire behaviour of wooden structures to determine the quantitative characteristics of heat flows to neighbouring protection facilities for the selection of safe fire separation distances.

Research methodology. To achieve the purpose of the study, field modelling of fire dynamics using the FDS computer software package was used. During the simulation, the values of temperatures and heat fluxes to neighbouring objects from fires in wooden buildings were obtained.

The results and their discussion. As a result of modelling of fire development in wooden buildings of different number of floors, values of the intensity of thermal radiation on neighbouring objects were obtained, including taking into account the wind load. The results of the calculations made it possible to develop proposals for the application of the data obtained in the development of sound regulatory requirements for fire safety.

Conclusion. It is shown that in case of fires in buildings with structures made of unprotected wood, with an increase in the number of floors, an increase in thermal effects on neighbouring objects is observed. In the presence of wind in the direction of a neighbouring object, the thermal effect also increases. When assessing safe distances, the possibility of combined exposure to radiant and convective flows should be taken into account. In order to comply with the current regulatory values of fire-fighting distances, it is necessary to increase the fire resistance of wooden buildings by increasing the fire resistance limits and reducing the fire hazard classes of load-bearing and enclosing building structures.

Keywords: wooden buildings; wooden structures; field modelling of fire; fire breaks; heat flow; spread of fire

For citation: Khasanov I.R., Zuev S.A., Abashkin A.A. Modeling of the thermal effects of fires in buildings made of wooden structures on neighboring objects. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(6):48-55. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.06.48-55 (rus).

✉ Irek Ravilevich Khasanov, e-mail: irhas@rambler.ru

Введение

В современных условиях строительство деревянных зданий, в том числе многоэтажных, вышло на новый технологический уровень и рассматривается как перспективное направление, особенно для сельских и пригородных районов. Также в последние годы при проектировании зданий все более заметную роль в выборе материалов конструкций играют экологические аспекты. В связи с этим возрос интерес к строительству зданий с использованием древесины. Этому также способствует широкое внедрение новых строительных конструкций и материалов: клееные деревянные панели (CLT), ориентировано-стружечные плиты (OSB), брусья из клееного шпона (LVL) и другое [1].

В Российской Федерации для зданий из незащищенных деревянных конструкций действующими нормативными документами по пожарной безопасности предусмотрен ряд ограничений [2]. Например, этажность таких зданий ограничена двумя этажами, а использовать их для детских учреждений и больниц не допускается. В зарубежных странах противопожарные требования к деревянным зданиям также связаны с этажностью, пределами огнестойкости несущих конструкций и применением горючих материалов в отделке [3]. При увеличении этажности (более двух) деревянных зданий необходимо обеспечение объекта системами обнаружения пожара и пожаротушения, включая использование конструктивной огнезащиты [4].

Пожарная опасность древесины характеризуется интенсивной скоростью тепловыделения и высокой температурой горения. Термическое разложение древесины начинается при температуре 110 °С. При

280–300 °С древесина воспламеняется и начинает интенсивно гореть [5].

Поведение деревянных конструкций при пожаре определяется материалом (цельная древесина, клееные панели, брусья и другое) и также их конструктивными особенностями [6]. Деревянные конструкции заводского исполнения (например, CLT-панели, клееный брус) имеют пожарно-технические характеристики, близкие к характеристикам конструкций из цельной древесины.

Величина теплового потока при пожаре, температура на обогреваемой поверхности и продолжительность облучения рядом стоящих зданий являются основными параметрами при оценке противопожарных разрывов. При этом значения этих параметров не должны превышать критических значений воспламенения горючих материалов соседнего объекта. При близких расстояниях воспламенение соседнего объекта, помимо теплового излучения, может произойти и за счет прямого контакта с пламенем. При крупных открытых пожарах возможны случаи распространения пожара на значительные расстояния за счет переноса искр и горящих конструктивных элементов [7].

Основы практических расчетов значений противопожарных разрывов между зданиями изложены в работах [8, 9], в которых основным механизмом распространения пожара между объектами принято излучение от факела пламени горящего здания. Расчеты противопожарных расстояний осуществляются, как правило, методом определения значений тепловых потоков, которые не должны превышать значения 12,5 кВт/м² на фасаде соседнего здания.

Для оценки распространения пожара на соседние объекты широко применяются методы полевого моделирования, которые позволяют, помимо тепло-

вого излучения, учитывать также конвективный перенос тепла [10, 11]. Широкое распространение получил компьютерный код [12], который применялся в ряде работ при исследовании динамики развития пожара, например, в целях обеспечения эвакуации в коттеджах и жилых квартирах [13, 14], для оценки распространения огня по фасадам зданий [15], при оценке теплового потока при пожаре через проемы [16], при расчетах противопожарных расстояний от наземных автостоянок до жилых зданий [17] и др.

Полевое моделирование развития и распространения пожара на объектах с применением деревянных конструкций рассмотрено в исторических районах Пекина [18], в жилой застройке домов с деревянными каркасами [19], на экспериментальных деревянных штабелях [20], в многоэтажном здании из CLT-панелей [21], в деревянном здании с учетом работы систем пожаротушения [22].

Цель настоящего исследования — изучение методом полевого моделирования особенностей поведения при пожаре в деревянных зданиях для определения количественных характеристик теплового воздействия на соседние объекты и выбора безопасных противопожарных расстояний.

Методология исследования

Моделирование пожара в деревянных зданиях и оценка наружного теплового воздействия на соседние объекты проводились по программе FDS [12]. Расчеты осуществлялись как в зданиях с незащищенными деревянными конструкциями, так и с конструкциями с нормируемыми пределами огнестойкости. Расстояние между зданиями принималось равным 15 м. Рассматривались два сценария погодных условий: отсутствие ветра и при наличии ветра скоростью 10 м/с в направлении фасада соседнего здания.

Минимальное (критическое) значение теплового потока, при котором происходило воспламенение фасада, принималось равным $12,5 \text{ кВт/м}^2$. Считалось, что при температуре 250°C начиналось тепловое разложение древесины, а при температуре 450°C — устойчивое горение.

Незащищенные деревянные конструкции из массива сосны имели толщину 0,1 м, при которой физическая толщина больше размера прогреваемого слоя — 0,02 м [23]. В этом случае самостоятельное горение поверхностей конструкций не происходит.

В качестве основного сценария развития пожара принималось круговое распространение огня по горючей нагрузке из древесины в одном из помещений нижнего этажа. Расчеты опасных факторов пожара проводились до достижения их максимальных значений. Основными параметрами, определяющими возможность распространения пожара, рассматривались значения плотностей теплового потока и поля тем-

ператур по всей высоте фасадной стены на соседнем объекте.

При оценке максимальных значений теплового потока на облучаемом фасаде соседнего деревянного здания считалось, что объект расположен по нормали от горящего здания.

Результаты и их обсуждение

Для изучения влияния этажности на распространение огня рассмотрены пожары в деревянном двухэтажном здании высотой 6 м и в четырехэтажном деревянном здании высотой 12 м. Ширина зданий 10 м.

Результаты компьютерных расчетов показали быстрое развитие пожара по объему зданий с выходом пламени на фасад. На рис. 1 и 2 показаны рассчитанные поля температур у фасадной стены соседнего здания при пожаре в двухэтажном деревянном

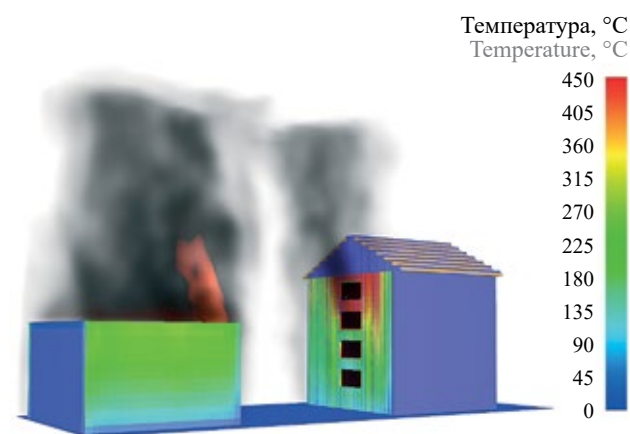


Рис. 1. Поля температур, $^\circ\text{C}$, фасадной стены соседнего деревянного здания на 800-й секунде при пожаре в двухэтажном деревянном здании

Fig. 1. The temperature field, $^\circ\text{C}$, of the facade wall of a neighbouring wooden building at the 800th second during a fire in a two-storey wooden building

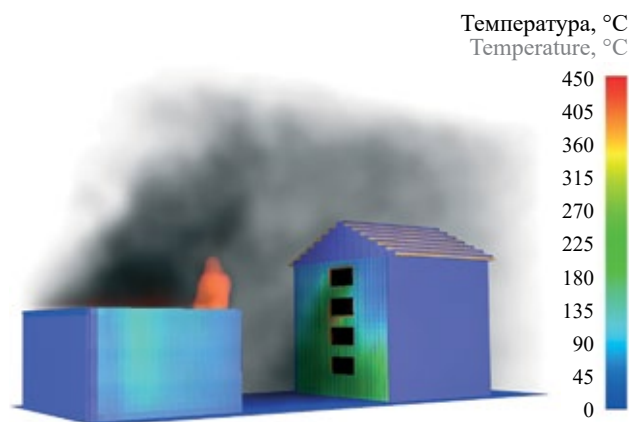


Рис. 2. Поля температур, $^\circ\text{C}$, фасадной стены соседнего здания на 800-й секунде при пожаре в двухэтажном деревянном здании с учетом влияния ветра 10 м/с

Fig. 2. Temperature fields, $^\circ\text{C}$, of the facade wall of the neighbouring building at the 800th second during a fire in a two-storey wooden building, taking into account the influence of wind 10 m/s

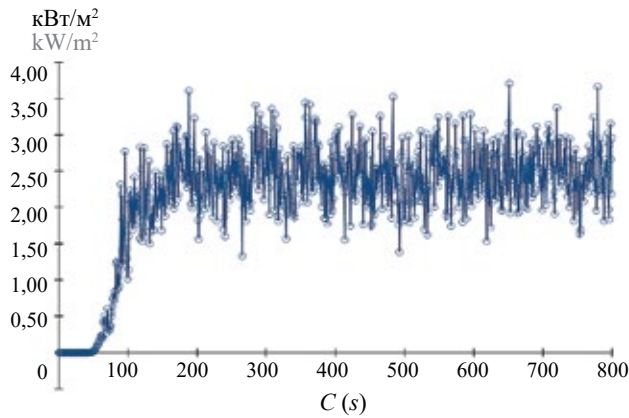


Рис. 3. Зависимость плотности падающего теплового потока, кВт/м², у фасадной стены соседнего здания от времени, с, при пожаре в двухэтажном деревянном здании
Fig. 3. The dependence of the density of the incident heat flow, kW/m², at the facade wall of the neighbouring building on the time, seconds, during a fire in a two-storey wooden building

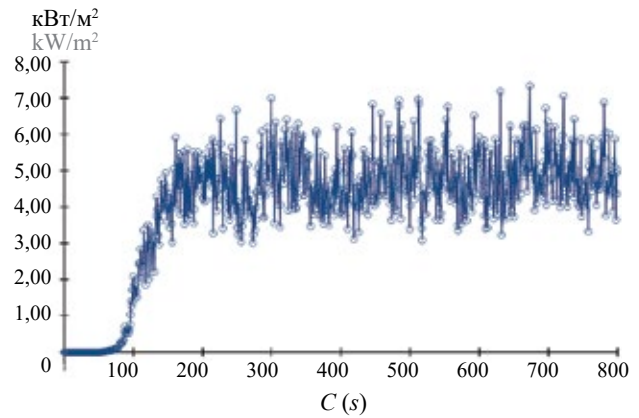


Рис. 6. Зависимость плотности падающего теплового потока, кВт/м², у фасадной стены соседнего здания (на уровне четвертого этажа) от времени при пожаре в четырехэтажном деревянном здании с учетом влияния набегающего ветра скоростью 10 м/с
Fig. 6. Dependence of the density of the incident heat flow, kW/m², at the facade wall of the neighbouring building (at the level of the fourth floor) on the time, seconds, during a fire in a four-storey wooden building, taking into account the influence of the incoming wind at a speed of 10 m/s

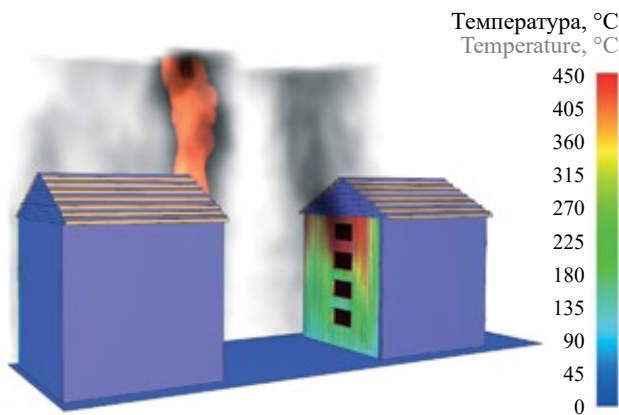


Рис. 4. Поля температур, °C, фасадной стены соседнего здания на 800-й секунде при пожаре в четырехэтажном деревянном здании
Fig. 4. Temperature fields, °C, of the facade wall of the neighbouring building at the 800th second during a fire in a four-storey wooden building

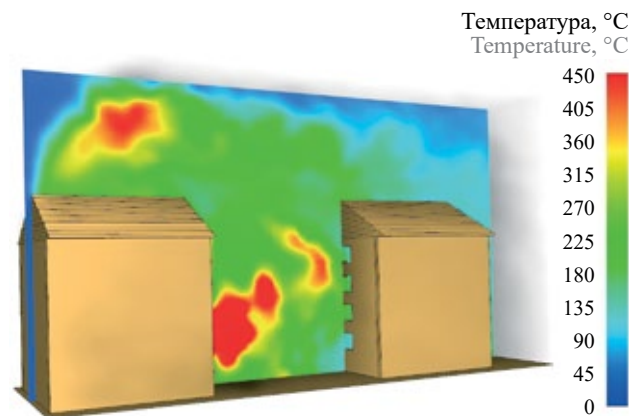


Рис. 5. Поля температур, °C, на 800-й секунде при пожаре в четырехэтажном деревянном здании с учетом влияния ветра 10 м/с
Fig. 5. Temperature fields, °C, at the 800th second during a fire in a four-storey wooden building, taking into account the influence of wind 10 m/s

здании в условиях отсутствия и при наличии ветра скоростью 10 м/с.

Наибольшее тепловое воздействие на соседний фасад четырехэтажного здания наблюдалось у верхних этажей в условиях отсутствия ветра (рис. 1). Температура стены достигала критических значений (450 °C) с дальнейшим возгоранием древесины. Моделирование пожара с учетом влияния ветра (рис. 2) показало снижение такой опасности, что можно объяснить охлаждением опасных участков ветровым потоком. Температура продуктов горения, конвективно воздействующих на поверхность стены, не превысила температуру начала теплового разложения древесины 250 °C.

Максимальные значения плотности теплового потока у фасада соседнего здания достигали на 200-й секунде, но не превышали критического значения 12,5 кВт/м² (рис. 3).

Моделирование пожара в четырехэтажном деревянном здании показало, что, по сравнению с пожаром в двухэтажном здании, наблюдается более интенсивный прогрев фасадной стены соседнего здания как при отсутствии ветра (рис. 4), так при ветровой нагрузке (рис. 5).

Достижение максимального значения теплового потока у фасадной стены соседнего здания (7 кВт/м²) после 200-й секунды наблюдалось при воздействии ветровой нагрузки (рис. 6). Вместе с тем совместное воздействие лучистого потока и конвективных продуктов горения потенциально могут привести к активному тепловому разложению и последующему возгоранию незащищенной древесины фасадной стены.

Моделирование проводилось также для пожара в четырехэтажном деревянном здании с огнестой-

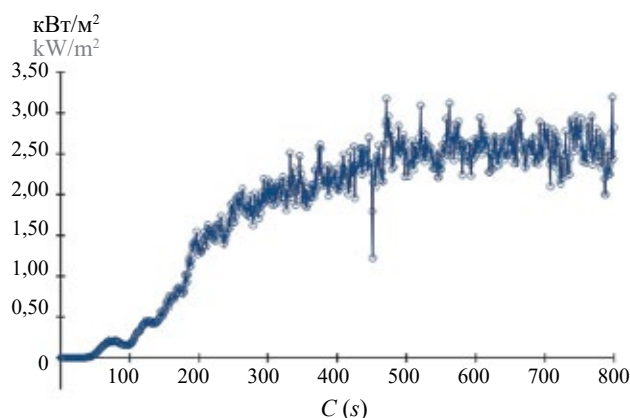


Рис. 7. Зависимость плотности падающего теплового потока, кВт/м², у фасадной стены соседнего здания от времени при пожаре в четырехэтажном деревянном здании с огнестойкими ограждающими конструкциями

Fig. 7. Dependence of the density of the incident heat flow, kW/m², at the facade wall of the neighbouring building on the time, seconds, of a fire in a four-storey wooden building with fire-resistant building structures

кими ограждающими конструкциями. В этом случае наблюдалось снижение скорости распространения пожара по зданию и снижение теплового потока на соседний объект до 2,5 кВт/м² (рис. 7).

Заключение

Анализ особенностей деревянных зданий показал их повышенную пожарную опасность, что повышает риск распространения пожара на соседние здания.

Результаты компьютерного моделирования пожара показали, что для зданий до четырех этажей с наружными стенами из «термически толстых» деревянных конструкций (срубы из бревен, брусьев, клееных

CLT-панелей) действующие нормативные значения противопожарных расстояний обеспечивают ограничение распространения пожара на соседний объект. Для фасадных стен из «термически тонких» конструкций (толщиной менее 0,02 м), которые способны к самостоятельному пламенному горению, возможен охват пламенем значительной части стены горящего здания с дальнейшим увеличением теплового воздействия на соседние объекты.

Оценка теплового воздействия на соседнее деревянное здание также показала, что совместное воздействие лучистого и конвективного потоков на фасады из незащищенной древесины может привести к их разогреву до температуры термического разложения и последующему возгоранию. Потенциальная возможность такого воздействия особенно актуальна для деревянных зданий повышенной этажности (более двух этажей). Вместе с тем при устройстве в деревянных зданиях огнестойких конструкций тепловое воздействие на соседние объекты снижается практически до значений, сравнимых с тепловым воздействием от зданий с высокой пожарной устойчивостью.

Для снижения опасности распространения огня на деревянные здания необходимо проведение мероприятий по огнезащите фасадных стен конструктивными способами, включая отделку огнезащитными материалами, пропитку огнезащитными составами (антипиренами), огнезащитными лаками.

Результаты исследований позволяют осуществить совершенствование нормативных требований для обеспечения пожарной безопасности деревянных зданий различной этажности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хасанов И.Р. Особенности пожарной опасности зданий из деревянных конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2016. Т. 25. № 11. С. 51–60. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.51-60
2. Гордиенко Д.М., Абашкин А.А., Хасанов И.Р., Зуев С.А. Нормативное регулирование в области пожарной безопасности многоэтажных зданий из деревянных конструкций // Пожарная безопасность. 2023. № 1 (110). С. 59–67. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2023.110.1.006
3. Östman B. National fire regulations for the use of wood in buildings : worldwide review 2020 // Wood Material Science and Engineering. 2021. No. 17 (1). Pp. 1–4. DOI: 10.1080/17480272.2021.1936630
4. Östman B., Brandon D., Frantzi H. Fire safety engineering in timber buildings // Fire Safety Journal. 2017. No. 91. Pp. 11–20. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.05.002
5. Aseeva R., Serkov B., Sivenkov A. Fire behavior and fire protection in timber buildings. 2014. 290 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5
6. Albert C.M., Liew K.C. Recent development and challenges in enhancing fire performance on wood and wood-based composites : a 10-year review from 2012 to 2021 // Journal of Bioresources and Bioproducts. 2024. Vol. 9. Issue 1. Pp. 27–42. DOI: 10.1016/j.jobab.2023.10.004
7. O'Connor D.J. The building envelope: fire spread, construction features and loss examples // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition. Society of Fire Protection Engineers. 2016. Pp. 3242–3282. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_86
8. Ройтман М.Я. Пожарная профилактика в строительном деле. М. : ВИПТШ МВД СССР, 1975. 256 с.
9. Романенко П.Н., Кошмаров Ю.А., Баширицев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. М. : ВИПТШ МВД СССР, 1977. 415 с.

10. Рыжов А.М., Хасанов И.Р., Карпов А.В., Волков А.В. и др. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях : методические рекомендации. М. : ВНИИПО, 2002. 35 с.
11. McGrattan K., Miles S. Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD) // *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Fifth Edition. Society of Fire Protection Engineers, 2016. Pp. 1034–1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_32
12. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K. et al. Fire dynamics simulator user's guide: NIST Special Publication 1019. 6th Ed. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2013. 262 p.
13. Lu W.L., Cheng J.X. Numerical Simulation Analysis of Fire in Ancient Building burning Temple // *Fire Science and Technology*. 2012. No. 4. Pp. 290–293. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2011.04.006
14. Enaru I., Chereches N.-C., Hudişteanu S.-V., Ţurcanu E.-F. et al. Numerical Simulation Evaluation of Fire Spreading in a Building Using Fire Dynamics Simulator (FDS) // *Journal of Applied Engineering Sciences*. 2023. Vol. 13 (26). Pp. 65–72. DOI: 10.2478/jaes-2023-0009
15. Nguyen H.T., Abu-Zidan Y., Zhang G., Nguyen K.T.Q. Machine learning-based surrogate model for calibrating fire source properties in FDS models of facade fire tests // *Fire Safety Journal*. 2022. Vol. 130. P. 103591. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103591
16. Misic N., Dusica N., Pesic J. Simulation of fire radiative heat flux through compartment openings using FDS // 24th International Conference on Fire Protection. Ostrava, 2015. Pp. 380–383.
17. Хасанов И.Р., Зуев С.А., Абашкин А.А., Зуева А.С. Противопожарные расстояния от наземных автостоянок до жилых зданий // *Пожарная безопасность*. 2022. № 1 (106). С. 57–66. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2022.75.67.005
18. Huai C., Xie J., Liu F., Liu J. Experimental and numerical analysis of fire risk in historic Chinese temples: a case in Beijing // *International Journal of Architectural Heritage*. 2021. No. 16 (12). Pp. 1844–1858. DOI: 10.1080/15583058.2021.1916648
19. Zhang F., Shi L., Liu S. CFD-based framework for fire risk assessment of contiguous wood-frame villages in the western Hunan region // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 54. Pp. 104607–104607. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104607
20. Janardhan K., Hostikka S. Predictive computational fluid dynamics simulation of fire spread on wood cribs // *Fire Technology*. 2019. No. 55 (4). Pp. 2245–2268. DOI: 10.1007/s10694-019-00855-3
21. Hayajneh S., Naser J. Fire Spread in Multi-Storey Timber Building, a CFD Study // *Fluids*. 2023. No. 8 (5). Issue 140. 17 p. DOI: 10.3390/fluids8050140
22. Zhao X., Wei S., Chu Y., Wang N. Numerical simulation of fire suppression in stilted wooden buildings with fine water mist based on FDS // *Buildings*. 2023. No. 13. P. 207. DOI: 10.3390/buildings13010207
23. Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2010. 262 с.

REFERENCES

1. Khasanov I.R. Features of fire safety of buildings of wooden structures. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(11):51-60. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.51-60 (rus).
2. Gordienko D.M., Abashkin A.A., Khasanov I.R., Zuev S.A. Regulatory regulation in the field of fire safety of multi-storey buildings made of wooden structures. *Fire Safety*. 2023; 1:59-67. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2023.110.1.006 (rus).
3. Östman B. National fire regulations for the use of wood in buildings : worldwide review 2020. *Wood Material Science and Engineering*. 2021; 17(1):1-4. DOI: 10.1080/17480272.2021.1936630
4. Östman B., Brandon D., Frantzich H. Fire safety engineering in timber buildings. *Fire Safety Journal*. 2017; 91:11-20. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.05.002
5. Aseeva R., Serkov B., Sivenkov A. *Fire behavior and fire protection in timber buildings*. 2014; 290. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5
6. Albert C.M., Liew K.C. Recent development and challenges in enhancing fire performance on wood and wood-based composites : a 10-year review from 2012 to 2021. *Journal of Bioresources and Bioproducts*. 2024; 9(1):27-42. DOI: 10.1016/j.jobab.2023.10.004
7. O'Connor D.J. The Building Envelope: Fire Spread, Construction Features and Loss Examples. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5th Ed. Society of Fire Protection Engineers, 2016; 3242-3282. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_86
8. Roitman M.Ya. *Fire prevention in construction*. Moscow, VIPTSH of the Ministry of Internal Affairs of the USSR, 1975; 256. (rus).
9. Romanenko P.N., Koshmarov Yu.A., Bashkirtsev M.P. *Thermodynamics and heat transfer in firefighting*. Moscow, VIPTSH of the Ministry of Internal Affairs of the USSR, 1977; 415. (rus).

10. Ryzhov A.M., Khasanov I.R., Karpov A.V., Volkov A.V. et al. *Application of the field method of mathematical modeling of indoor fires : methodological recommendations*. Moscow, VNIPO, 2002; 35. (rus).
11. McGrattan K., Miles S. Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition*. Society of Fire Protection Engineers, 2016; 1034-1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_32
12. McGrattan K., McDermott R., Weinschenk C., Overholt K. et al. *Fire dynamics simulator user's guide: NIST Special Publication 1019. Sixth Edition*. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 2013; 262.
13. Lu W.L., Cheng J.X. Numerical simulation analysis of fire in ancient building burning temple. *Fire Science and Technology*. 2012; 4:290-293. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2011.04.006
14. Enaru I., Chereches N.-C., Hudișteanu S.-V., Țurcanu E.-F. et al. Numerical simulation evaluation of fire spreading in a building using Fire Dynamics Simulator (FDS). *Journal of Applied Engineering Sciences*. 2023; 13(26):65-72. DOI: 10.2478/jaes-2023-0009
15. Nguyen H.T., Abu-Zidan Y., Zhang G., Nguyen K.T.Q. Machine learning-based surrogate model for calibrating fire source properties in FDS models of facade fire tests. *Fire Safety Journal*. 2022; 130:103591. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103591
16. Misić N., Dusica N., Pesic J. Simulation of fire radiative heat flux through compartment openings using FDS. *24th International Conference on Fire Protection*. Ostrava, 2015; 380-383.
17. Khasanov I.R., Zuev S.A., Abashkin A.A., Zueva A.S. Fire-fighting distances from surface parking lots to residential buildings. *Fire Safety*. 2022; 1(106):57-66. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2022.75.67.005 (rus).
18. Huai C., Xie J., Liu F., Liu J. Experimental and numerical analysis of fire risk in historic Chinese temples: a case in Beijing. *International Journal of Architectural Heritage*. 2021; 16(12):1844-1858. DOI: 10.1080/15583058.2021.1916648
19. Zhang F., Shi L., Liu S. CFD-based framework for fire risk assessment of contiguous wood-frame villages in the western Hunan region. *Journal of Building Engineering*. 2022; 54:104607-104607. DOI: 10.1016/j.job.2022.104607
20. Janardhan K., Hostikka S. Predictive computational fluid dynamics simulation of fire spread on wood cribs. *Fire Technology*. 2019; 55(4):2245-2268. DOI: 10.1007/s10694-019-00855-3
21. Hayajneh S., Naser J. Fire spread in multi-storey timber building, a CFD Study. *Fluids*. 2023; 8(5):140:17. DOI: 10.3390/fluids8050140
22. Zhao X., Wei S., Chu Y., Wang N. Numerical simulation of fire suppression in stilted wooden buildings with fine water mist based on FDS. *Buildings*. 2023; 13:207. DOI: 10.3390/buildings13010207
23. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. *Burning of wood and its fire-hazardous properties : monograph*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2010; 262. (rus).

Поступила 24.08.2024, после доработки 06.11.2024;

принята к публикации 11.11.2024

Received August 24, 2024; Received in revised form November 6, 2024;

Accepted November 11, 2024

Информация об авторах

ХАСАНОВ Ирек Равильевич, д.т.н., главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0002-5659-0746; ResearcherID: T-4177-2017; РИНЦ ID: 157014; e-mail: irhas@rambler.ru

ЗУЕВ Станислав Анатольевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0003-4498-3021; РИНЦ ID: 328576; e-mail: k708@yandex.ru

Information about the authors

Irek R. KHASANOV, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5659-0746; ResearcherID: T-4177-2017; ID RSCI: 157014; e-mail: irhas@rambler.ru

Stanislav A. ZUEV, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4498-3021; ID RSCI: 328576; e-mail: k708@yandex.ru

АБАШКИН Александр Анатольевич, начальник отдела, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: one_15@bk.ru

Вклад авторов:

Хасанов И.Р. — *научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; написание исходного текста; итоговые выводы.*

Зуев С.А. — *выбор направлений моделирования; проведение компьютерных расчетов; написание исходного текста; итоговые выводы.*

Абашкин А.А. — *участие в выборе методов моделирования; общее руководство; доработка текста; итоговые выводы. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

Aleksandr A. ABASHKIN, Head of Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: one_15@bk.ru

Contribution of the authors:

Khasanov I.R. — *scientific guidance; conducting computer calculations; research concept; writing the draft; final conclusions.*

Zuev S.A. — *choice of modeling directions; formulation of the initial problem; writing the draft; final conclusions.*

Abashkin A.A. — *participation in the selection of modeling methods; general guidance; revision of the text; final conclusions. The authors declare no conflicts of interests.*