

Научная статья

УДК 614.843; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-133-142

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ ПОМЕЩЕНИЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЫМА ПРИ ПОЖАРЕ: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

✉ Османов Шамиль Абубакарович;

Клюй Владимир Владимирович.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия.

Козлова Ирина Викторовна.

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия

✉ sh.osmanov@igps.ru

Аннотация. Для обеспечения безопасности граждан и объектов защиты в высотных зданиях проектируются и устанавливаются системы пожарной сигнализации. Одним из ключевых факторов при ее проектировании является характер распространения дыма при пожаре, который, в свою очередь, сильно зависит от высоты потолков.

Предметом исследования выступает процесс распространения дыма при пожаре в помещениях различной высоты.

Методологическая база исследования включает численное моделирование данного процесса, которое было осуществлено в программном продукте Fire Dynamic Simulation с дальнейшей визуализацией данных в Smokeview.

Полученные данные свидетельствуют о том, что при высоте потолков 4 и 8 м вертикальный уровень задымления происходит быстрее горизонтального, в связи с чем на этих высотах предпочтительнее установка дымовых линейных извещателей традиционным способом (горизонтально). Начиная с высоты потолков в 12 м более выгодным является расположение дымовых линейных извещателей вертикально. Выявленные особенности могут быть полезны как на этапах проектирования, так и монтажа систем пожарной сигнализации. В рамках направлений дальнейших исследований целесообразно исследовать процесс распространения дыма в помещениях различной высоты и геометрии более детально и на основе полученных данных осуществить изменение действующих нормативно-правовых документов, регламентирующих проектирование систем пожарной сигнализации.

Ключевые слова: распространение дыма, высота помещения, дымовой линейный извещатель, опасные факторы пожара, пожарная сигнализация, FDS, Smokeview

Для цитирования: Османов Ш.А., Клюй В.В., Козлова И.В. Влияние высоты помещения на распространение дыма при пожаре: исследование методом численного моделирования // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 3 (75). С. 133–142. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-133-142.

Scientific article

INFLUENCE OF THE HIGHT OF THE ROOM ON THE DISTRIBUTION OF SMOKE DURING A FIRE: STUDY BY NUMERICAL MODELING

✉ Osmanov Shamil A.;

Klyuy Vladimir V.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia.

Kozlova Irina V.

Academy of the state fire service of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia

✉ sh.osmanov@igps.ru

Abstract. To ensure the safety of citizens and protected facilities, fire alarm systems are designed and installed in high-rise buildings. One of the key design factors is the nature of smoke propagation during a fire, which in turn is highly dependent on ceiling height.

This study examines smoke propagation during a fire in high-rise buildings.

The study's methodology includes numerical modeling of this process, which was performed using Fire Dynamic Simulation software, followed by data visualization in Smokeview.

The data obtained indicate that at ceiling heights of 4 and 8 meters, vertical smoke accumulation occurs faster than horizontal smoke accumulation. Therefore, at these heights, traditional horizontal installation of linear smoke detectors is preferable. Above ceiling heights of 12 meters, vertical placement of linear smoke detectors is more advantageous. The identified characteristics can be useful both during the design and installation stages of fire alarm systems. As part of further research directions, it is advisable to study the process of smoke propagation with a smaller step in ceiling height and, based on the data obtained, make changes to the current regulatory documents governing the design of fire alarm systems.

Keywords: smoke spread, room height, linear smoke detector, fire hazards, fire alarm, FDS, Smokeview

For citation: Osmanov Sh.A., Klyu V.V., Kozlova I.V. Influence of the hight of the room on the distribution of smoke during a fire: study by numerical modeling // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 3 (75). P. 133–142. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-3-133-142.

Введение

Рост численности населения влечет неизбежное увеличение высотности вновь возводимых зданий и, в том числе, увеличения их внутреннего пространства. Так как высота потолков во многих высотных зданиях превышает стандартную отметку, то увеличивается риск возникновения пожара [1]. В последние годы пожары в высотных зданиях уносят все большее количество жизней [2], в связи с чем привлекают все большее внимание исследователей [3]. Поэтому можно сделать вывод, что данная тема является актуальной [4, 5].

Обнаружение очага возгорания на ранней стадии является ключевым фактором, позволяющим сократить количество нанесенного материального и социального ущерба пожаром. Для этих целей созданы и успешно функционируют системы пожарной сигнализации. Традиционным элементом таких систем является дымовой пожарный извещатель. Его функциональные особенности и техническое строение постоянно исследуются рядом крупных мировых компаний, в частности Международной организацией по стандартизации (ISO) [6], Underwriters Laboratories Inc (UL) [7, 8], Британским институтом стандартов (BSI) [9, 10] и Национальной ассоциацией противопожарной защиты (NFPA) [11, 12].

Однако в зданиях с большой площадью и высотой потолков обнаружение пожаров на ранней стадии весьма затруднительно, поскольку на данный процесс оказывает воздействие конвекция, которая приводит к возникновению эффекта теплового барьера. На текущий момент для обнаружения пожара с большой высотой потолков используются дымовые линейные извещатели, принцип работы которых основывается на постоянном мониторинге прозрачности воздуха, и в случае ее снижения под воздействием частиц дыма происходит оповещение о возникновении пожара.

Анализ отечественных публикаций в электронной научной базе e-Library показал, что исследования распространения дыма в зависимости от высоты помещения практически отсутствуют.

Анализ международных исследований в базе данных Google Scholar в области распространения дыма в зависимости от высоты помещения демонстрирует, что практически все публикации апробированы в последние несколько лет, что также свидетельствует об актуальности проблемы. В подавляющем большинстве из них исследуется взаимосвязь между процессом горения и срабатыванием системы пожарной сигнализации. В помещениях с очень высокими и узкими потолками процесс распространения дыма исследуется на основе распространения тепловых потоков [13]. Также изучаются характеристики движения дыма в технических пустотах многоэтажных зданий [14] и влияние опасных факторов пожара (ОФП) на процесс эвакуации [15], а также и их воздействие на пожарные отсеки [16]. В работе [17] обнаружение пожара в зданиях повышенной этажности предлагается осуществлять по параметру скорости образования сажи, но исследования в данном направлении еще продолжаются. Однако в вышеупомянутых исследованиях не изучался процесс распространения дыма в зависимости от высоты помещения, но он имеет практическое значение при выборе, проектировании и монтаже системы пожарной сигнализации.

По результатам проведенного анализа были сделаны следующие выводы:

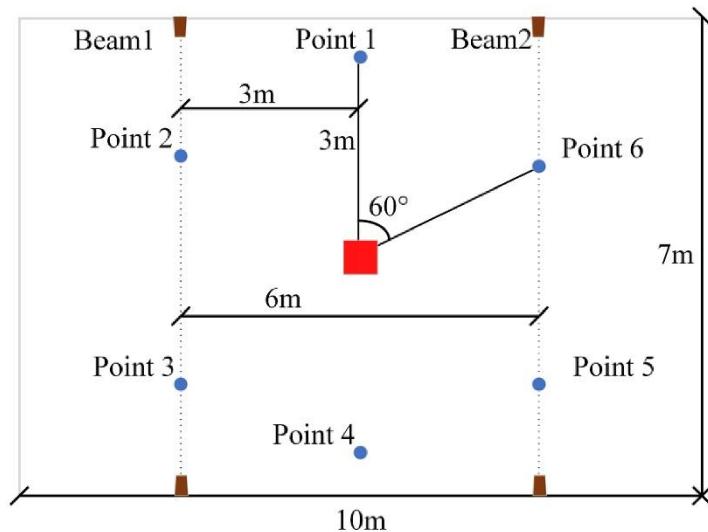
- обнаружение пожара на ранних стадиях в высотных зданиях весьма затруднительно, поскольку возникают сильная конвекция и эффект теплового барьера;
- отечественные исследования в области распространения дыма в зависимости от высоты помещения практически отсутствуют;
- на текущий момент наблюдается тенденция урбанизации городов, увеличения этажности застройки и числа пожаров в высотных зданиях, в связи с чем материалы исследования являются актуальными.

Материалы и методы исследования

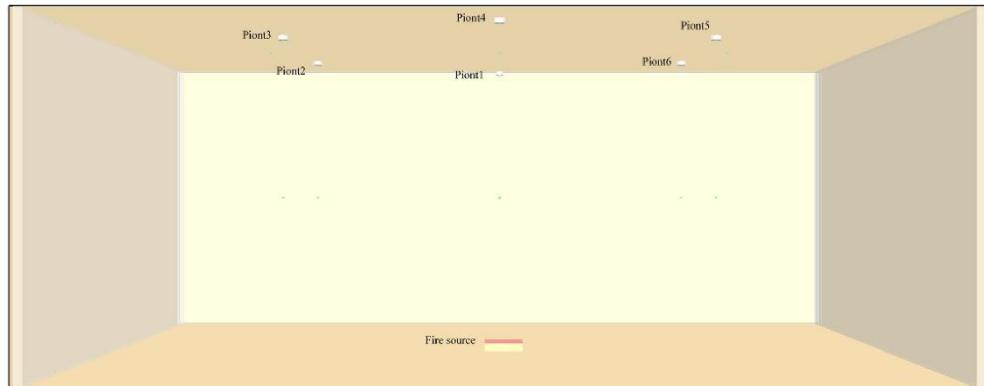
Для проведения моделирования динамики пожара был использован программный продукт FDS (Fire Dynamic Simulation), поскольку он обладает открытым исходным кодом и позволяет учитывать особенности распространения ОФП, а также получать визуальное изображение протекаемых процессов. Для визуализации данных моделирования была использована программа Smokeview. Кроме того, он обладает возможностью получения данных с различных датчиков, которые можно устанавливать на разных высотах. С применением данного программного продукта была построена имитационная модель моделируемого помещения. Его основные размеры представлены в таблице. Расположение дымовых линейных извещателей в моделируемых сценариях представлено на рис. 1.

Характеристики помещения в моделируемом сценарии

№ сценария	Длина помещения, м	Ширина помещения, м	Высота потолка помещения, м
1	10,0	7,0	4,0
2			8,0
3			12,0
4			16,0
5			20,0



(A)



(B)

Рис. 1. Расположение датчиков пожарной сигнализации в моделируемых сценариях:

(A) – вид сверху; (B) – трехмерный вид
 (point – датчики обнаружения ОФП; beam – дымовой линейный извещатель;
 fire source – очаг возгорания)

Датчики обнаружения ОФП были расположены на расстоянии 3 м от очага возгорания под углом в 60° друг к другу. По ширине помещения была расположена система лазерных датчиков. Размер сетки моделирования был использован с гранью 0,1 м. Очаг возгорания представляет собой древесину со следующими параметрами:

- скорость выделения тепла – 500 кВт/м;
- площадь очага возгорания – $0,25 \text{ м}^2$;
- скорость выделения тепла – 125 кВт.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 представлены облачные диаграммы температуры для высот 4, 8, 12, 16 и 20 м соответственно. По результатам моделирования было выявлено, что максимальная температура не превышает отметки в 60 °C (за исключением отметки высоты – 4 м). На высоте 4 м горячий дым скапливается под потолком, и температура увеличивается. В то время как увеличение высоты потолка приводит к изменению (снижению) температуры. При заданной скорости выделения тепла (125 кВт) и высоте помещения 4 м наблюдается наиболее контрастное изменение температуры. При увеличении высоты потолка цветовой тон полученных диаграмм постепенно становится холоднее, что свидетельствует об уменьшении температуры.

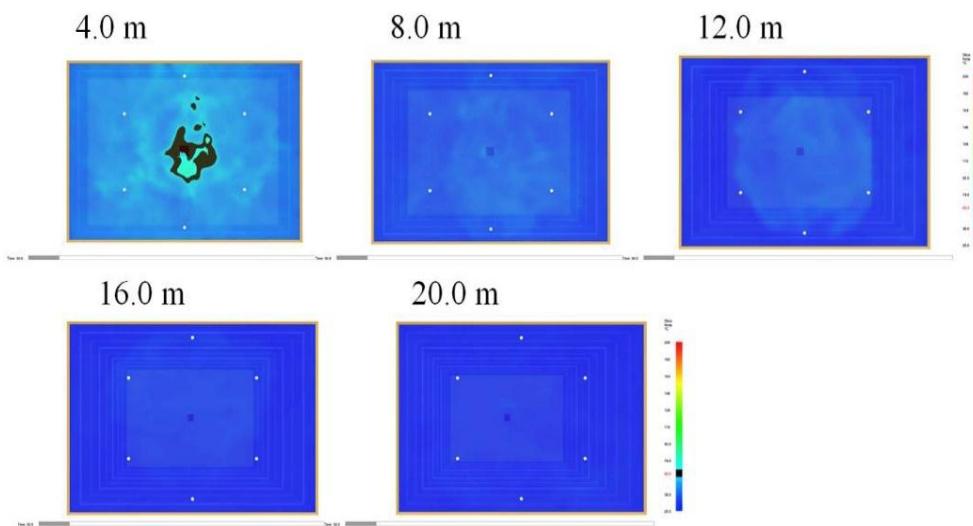


Рис. 2. Облачные диаграммы температуры под потолком на высотах 4, 8, 12, 16 и 20 м

После моделирования температуры было исследовано влияние дыма на видимость в помещении при разной высоте. Полученные облачные диаграммы температуры представлены на рис. 3, при этом, когда зона видимости достигает критической отметки (невозможна эвакуация людей при потере видимости), выводится временное значение данного показателя. В частности, 5,7 с, 8,1 с, 11,1 с и 18,0 с для высот 4, 8, 12, 16 и 20 м соответственно.

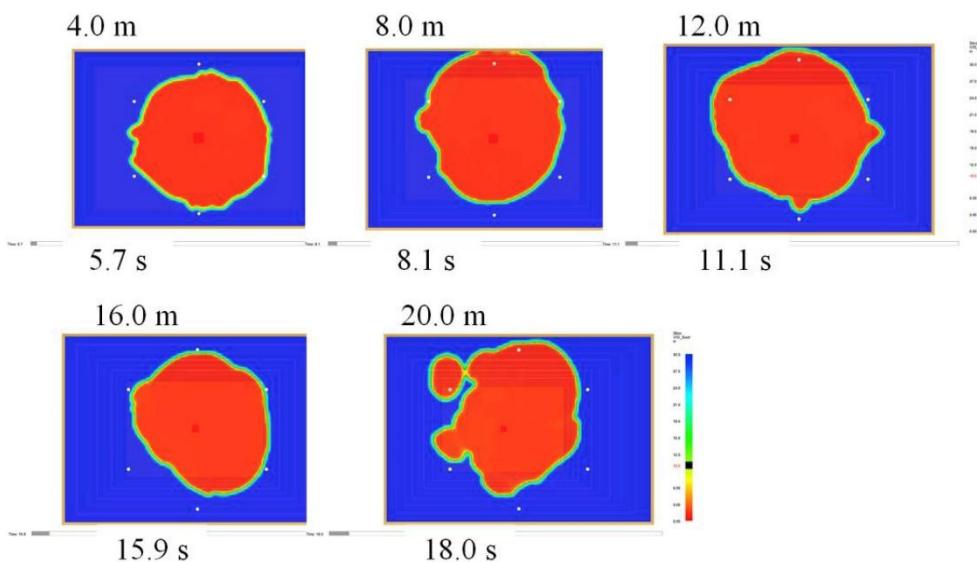


Рис. 3. Диаграмма видимости при высоте потолков 4, 8, 12, 16 и 20 м

Для более точного исследования процессов изменения температуры в помещении были рассчитаны температурные кривые в моделируемом помещении (рис. 4). Полученные данные представляют собой среднее арифметическое значение с шести контрольных датчиков.

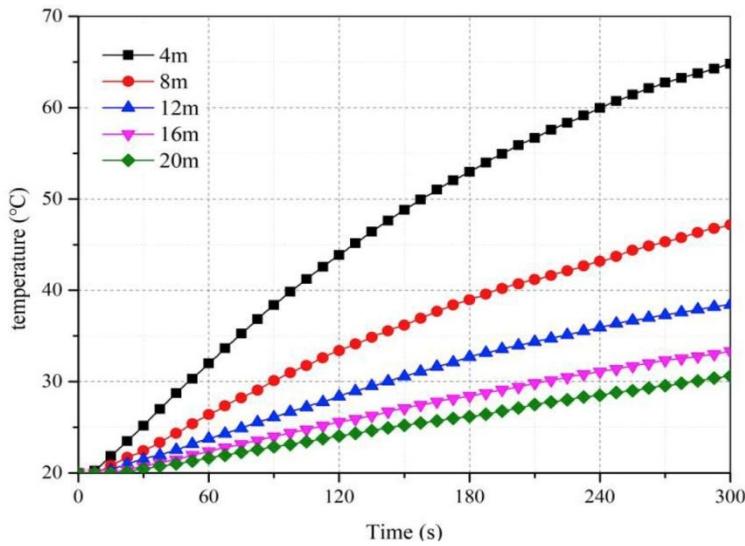


Рис. 4. Температурные кривые на высотах 4, 8, 12, 16 и 20 м
(temperature – температура, °C; Time – время, с)

Из рис. 4 следует, что расстояние между кривыми увеличивается с уменьшением высоты, что коррелирует с данными, представленными на диаграммах видимости (рис. 3). Также было выявлено, что при увеличении высоты потолка уменьшается температура в помещении.

В моделируемом помещении также были расставлены детекторы дыма. Исследование процесса срабатывания пожарной сигнализации при различных сценариях с изменяющейся высотой потолков осуществлялось с учетом степени затемнения детекторов дыма. Для этого была использована модель Хескестада с одним параметром [18]. Степень замутнения детекторов дыма (obscuration) рассчитывалась по методике, указанной в работе [19].

Степень задымления при различной высоте потолка представлена на рис. 5, в правой части которого представлена более детальная диаграмма начального этапа моделирования.

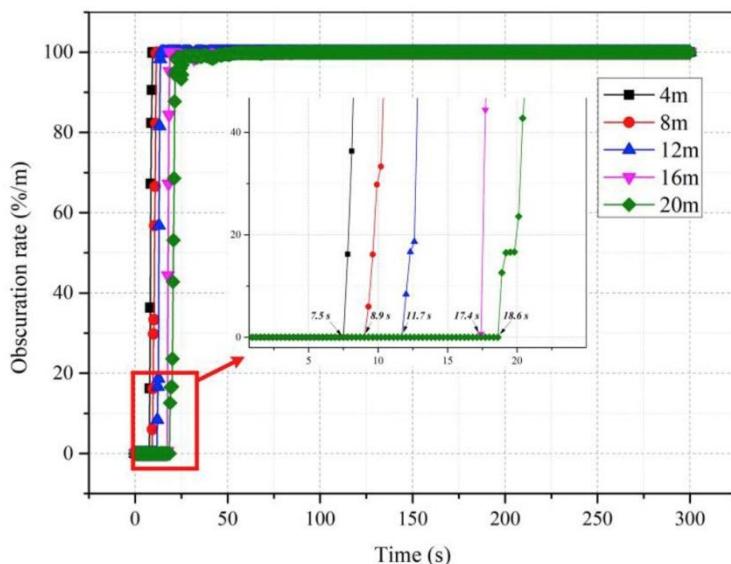


Рис. 5. Кривые зависимости коэффициента блокировки на потолках высотой 4, 8, 12, 16 и 20 м
(Obscuration rate – скорость задымления, %/м; Time – время, с)

Из рис. 5 следует, что как только дым полностью закрывает датчик, значение кривой практически моментально достигает отметки в 100 %. Также наблюдается корреляция со значениями, представленными на рис. 3. Кроме того, скачки затемнения очень близки к точкам потери видимости.

В подавляющем большинстве случаев установка дымовых линейных извещателей осуществляется горизонтально, однако при высоких потолках установка многослойной системы датчиков будет финансово нецелесообразна, поэтому предлагается их вертикальная установка. На рис. 6 представлены результаты моделирования при горизонтальной и вертикальной установке дымовых линейных извещателей. Представленные численные значения рассчитаны как среднее арифметическое показателей с шести датчиков.

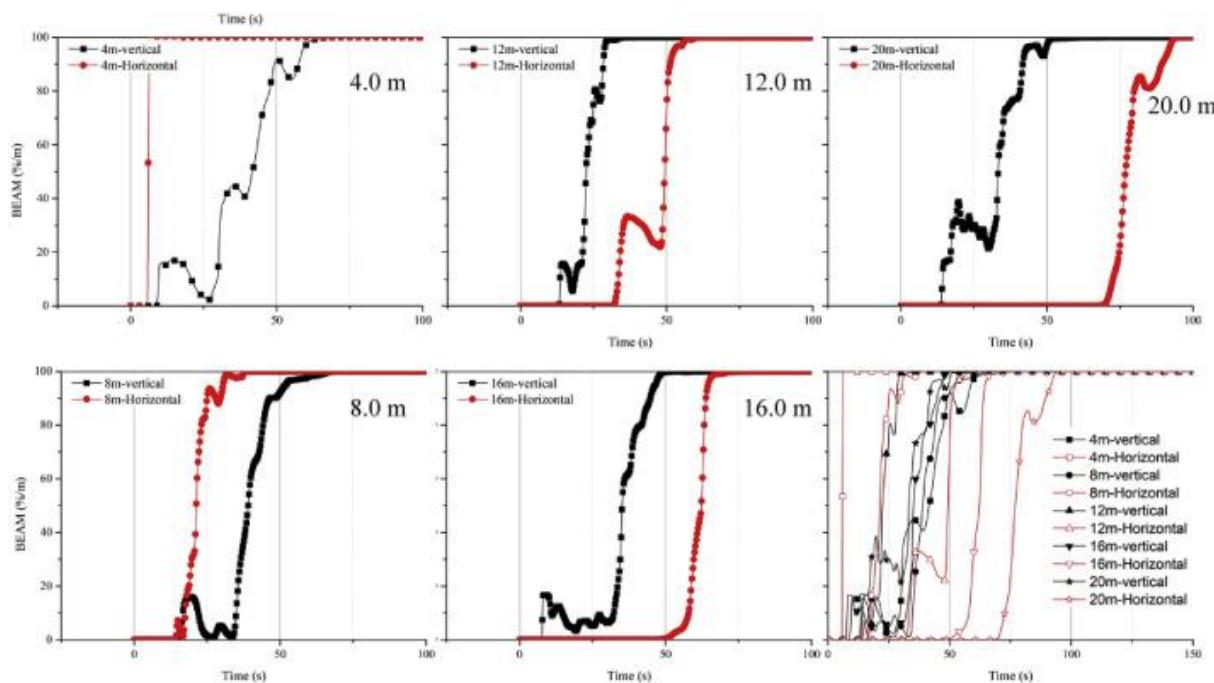


Рис. 6. Кривые затухания сигнала при горизонтальной (horizontal) и вертикальной (vertical) установке дымовых линейных извещателей на высоте 4, 8, 12, 16 и 20 м

В ходе моделирования было выявлено, что при высоте потолков 4 и 8 м вертикальный уровень задымления происходит быстрее горизонтального. Чем выше потолок, тем сложнее дыму достичь его, и это следует учитывать при установке датчиков ОФП. Из рис. 6 видно, что при высоте потолка менее 8 м горизонтальный способ установки эффективнее вертикального, а начиная с высоты потолка в 12 м вертикальный способ становится предпочтительнее горизонтального.

Выводы

В результате исследования распространения дыма в зависимости от высоты помещения методом численного моделирования было выявлено, что при высоте потолков 4 и 8 м вертикальный уровень задымления происходит быстрее горизонтального, в связи с чем на этих высотах предпочтительнее установка дымовых линейных извещателей традиционным способом (горизонтально). Начиная с высоты потолков в 12 м более выгодным является расположение дымовых линейных извещателей вертикально. Также следует учитывать, что температура слоя дыма на высоте 12 м не превышала значения 40 °C, то есть датчик ОФП не будет срабатывать при таких условиях. По результатам моделирования были сформулированы практические рекомендации по установке дымовых линейных извещателей в зависимости от высоты потолка.

Полученные данные могут быть полезны как на этапах проектирования, так и монтажа систем пожарной сигнализации. В рамках направлений дальнейших исследований целесообразно исследовать процесс распространения дыма в помещениях различной высоты и геометрии более детально и на основе полученных данных осуществить изменение действующих нормативно-правовых документов, регламентирующих проектирование систем пожарной сигнализации.

Список источников

1. Hu Yu., Wang X., Wang F.Yu. A quantitative study of factors influence on evacuation in building fire emergencies // IEEE transactions on computational social systems. 2018. Vol. 5. № 2. P. 544–552.
2. Зарипова Г.Ф., Маринич Е.Е. Разработка технических решений по ограничению распространения пожара в высотных зданиях // Студенческий. 2023. № 9-1 (221). С. 17–20. EDN YCJIVA.
3. Моделирование дымовой завесы в охраняемом помещении / А.М. Пурис [и др.] // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 1-2 (151-152). С. 91–97. EDN DKPFJG.
4. Мясников В.Г., Степанов В.А. Специфика тушения пожаров в зданиях повышенной этажности // Студенческий. 2024. № 39-1 (293). С. 56–60. EDN YZGWGH.
5. Rahmani A., Salem M. Simulation of fire in super high-rise hospitals using fire dynamics simulator (FDS) // Electronic Journal of General Medicine. 2020. Vol. 17. № 3. P. 5.
6. Smith P. G. Fire-detection and alarm systems // Wiring Installations and Supplies. 1977. Vol. 1977. № 3. P. 9–19.
7. Inc U.L. Smoke Alarms // Underwriters Laboratories Inc. 2015.
8. Inc U.L. Smoke Detectors for Fire Alarm Systems // Underwriters Laboratories Inc. 2016.
9. National Fire Protection Association et al. Standard for automotive fire apparatus. The Association, 1996.
10. National Fire Protection Association et al. NFPA 1901: Standard for automotive fire apparatus. The Association, 1996.
11. NFPA N. 72: National Fire Alarm Signaling Code // National Fire Protection Association. 2013.
12. NFPA P. J. NFPA 72 National Fire Alarm and Signaling Code. 2022.
13. Experimental study on the characteristics of fire smoke movement in ultra thin and tall atriums by hot smoke test / H. Zhang [et al.] // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2019. Vol. 79. P. 01007.
14. A Sauter mean diameter sensor for fire smoke detection / S. Wang [et al.] // Sensors and Actuators B: Chemical. 2019. Vol. 281. P. 920–932.
15. Tilley N., Merci B. Numerical study of smoke extraction for adhered spill plumes in atria: Impact of extraction rate and geometrical parameters // Fire safety journal. 2013. Vol. 55. P. 106–115.
16. Huang Yu., Chen X., Zhang C. Numerical simulation of the variation of obscuration ratio at the fire early phase with various soot yield rate // Case Studies in Thermal Engineering. 2020. Vol. 18. P. 100572.
17. A Sauter mean diameter sensor for fire smoke detection / S. Wang [et al.] // Sensors and Actuators B: Chemical. 2019. Vol. 281. P. 920–932.
18. SFPE handbook of fire protection engineering / P.J. DiNenno [et al.] // (No Title). 2002. P. 2–246.
19. Mulholland G.W., Croarkin C. Specific extinction coefficient of flame generated smoke // Fire and Materials. 2000. Vol. 24. № 5. P. 227–230.

References

1. Hu Yu., Wang X., Wang F.Yu. A quantitative study of factors influence on evacuation in building fire emergencies // IEEE transactions on computational social systems. 2018. Vol. 5. № 2. P. 544–552.
2. Zaripova G.F., Marinich E.E. Razrabotka tekhnicheskikh reshenij po ograniceniyu rasprostraneniya pozhara v vysotnyh zdaniyah // Studencheskij. 2023. № 9-1 (221). P. 17–20. EDN YCJIVA.
3. Modelirovaniye dymovoj zavesy v ohranyaemom pomeshchenii / A.M. Puris [i dr.] // Voprosy oboronnnoj tekhniki. Ser. 16: Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. 2021. № 1-2 (151-152). P. 91–97. EDN DKPFJG.
4. Myasnikov V.G., Stepanov V.A. Specifika tusheniya pozharov v zdaniyah povyshennoj etazhnosti // Studencheskij. 2024. № 39-1 (293). P. 56–60. EDN YZGWH.
5. Rahmani A., Salem M. Simulation of fire in super high-rise hospitals using fire dynamics simulator (FDS) // Electronic Journal of General Medicine. 2020. Vol. 17. № 3. P. 5.
6. Smith P. G. Fire-detection and alarm systems // Wiring Installations and Supplies. 1977. Vol. 1977. № 3. P. 9–19.
7. Inc U.L. Smoke Alarms // Underwriters Laboratories Inc. 2015.
8. Inc U.L. Smoke Detectors for Fire Alarm Systems // Underwriters Laboratories Inc. 2016.
9. National Fire Protection Association et al. Standard for automotive fire apparatus. The Association, 1996.
10. National Fire Protection Association et al. NFPA 1901: Standard for automotive fire apparatus. The Association, 1996.
11. NFPA N. 72: National Fire Alarm Signaling Code // National Fire Protection Association. 2013.
12. NFPA P. J. NFPA 72 National Fire Alarm and Signaling Code. 2022.
13. Experimental study on the characteristics of fire smoke movement in ultra thin and tall atriums by hot smoke test / H. Zhang [et al.] // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2019. Vol. 79. P. 01007.
14. A Sauter mean diameter sensor for fire smoke detection / S. Wang [et al.] // Sensors and Actuators B: Chemical. 2019. Vol. 281. P. 920–932.
15. Tilley N., Merci B. Numerical study of smoke extraction for adhered spill plumes in atria: Impact of extraction rate and geometrical parameters // Fire safety journal. 2013. Vol. 55. P. 106–115.
16. Huang Yu., Chen X., Zhang C. Numerical simulation of the variation of obscuration ratio at the fire early phase with various soot yield rate // Case Studies in Thermal Engineering. 2020. Vol. 18. P. 100572.
17. A Sauter mean diameter sensor for fire smoke detection / S. Wang [et al.] // Sensors and Actuators B: Chemical. 2019. Vol. 281. P. 920–932.
18. SFPE handbook of fire protection engineering / P.J. DiNenno [et al.] // (No Title). 2002. P. 2–246.
20. Mulholland G.W., Croarkin C. Specific extinction coefficient of flame generated smoke // Fire and Materials. 2000. Vol. 24. № 5. P. 227–230.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 26.08.2025; одобрена после рецензирования: 12.09.2025;
принята к публикации: 18.09.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 26.08.2025; approved after review: 12.09.2025;
accepted for publication: 18.09.2025

Информация об авторах:

Османов Шамиль Абубакарович, начальник отдела планирования, организации и координации научных исследований Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: sh.osmanov@igps.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5407-8394>, SPIN-код: 3661-1339

Клюй Валерий Владимирович, доцент кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: val-1964@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4053-7462>, SPIN-код: 2972-5083

Козлова Ирина Викторовна, заместитель начальника института развития Академии Государственной противопожарной службы МЧС России (129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4), кандидат технических наук, SPIN-код: 6661-7728

Information about the authors:

Osmanov Shamil A., head of the department of planning, organization, and coordination of scientific research of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: sytdykov@igps.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5343-4764>, SPIN: 7548-0539

Klyuy Vladimir V., associate professor of the department of fire fighting and emergency rescue operations of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: shilov@igps.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9771-8665>, SPIN: 9775-0258

Kozlova Irina V., deputy head of the development institute of Academy of State fire service of EMERCOM of Russia (129366, Saint-Petersburg, Moscow, Boris Galushkin Str. 4), candidate of technical sciences, SPIN: 6661-7728