



УДК 697.921

Ю. Р. КАРЕЕВА¹, канд. тех. наук, доц. кафедры теплоэнергетики, газоснабжения и вентиляции; М. Э. АЛЁШИН², инженер-проектировщик 2 категории; М. Б. ЧУХЛОВА¹, аналитик управления научно-исследовательской деятельности

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ И ФАКТИЧЕСКОЙ СРЕДНЕОБЪЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЫМОВОГО СЛОЯ

¹ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1.

Тел.: +7(843) 510-46-01; факс: +7(843) 238-79-72; эл. почта: kareeva@kgasu.ru

²ООО «Метрополис». Россия, 420012, г. Казань, ул. Маяковского, д. 4, пом. № 1002 эт. 2, комн. № 1. Тел.: +7 (843) 211-03-72.

Ключевые слова: противодымная вентиляция, FDS, моделирование, очаг пожара, температура газовой среды, PyroSim, система дымоудаления, дымоудаление из коридора.

Произведен расчет системы противодымной вентиляции в коридоре прямолинейной конфигурации и определена среднеобъемная температура дымового слоя, согласно расчетной методике Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны, проведено сравнение полученных данных с результатом математического моделирования с помощью программного комплекса PyroSim. Результаты сравнения позволяют оценить адекватность использования численной модели.

Обеспечение пожарной безопасности зданий и сооружений является приоритетной задачей, требующей применения современных методов анализа и прогнозирования развития пожара. В частности, важным параметром, определяющим условия эвакуации и работы пожарных подразделений, является температура дымового слоя [1-3]. Существующие методики расчета, такие как метод Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны (ВНИИПО), широко используются в практике проектирования систем пожарной безопасности [4-7]. Однако, они основаны на упрощенных моделях и допущениях. Одним из ключевых упрощений является предположение об однородности температуры в пределах дымового слоя. В реальности температура может существенно варьироваться по высоте и площади, особенно вблизи очага пожара или при наличии препятствий на пути распространения дыма [8-10]. Другим важным допущением является пренебрежение теплообменом через строительные конструкции. Методика фокусируется в основном на конвективном и радиационном теплообмене внутри помещения, игнорируя теплопотери через стены, потолок и пол. Это может приводить к завышению расчетных температур дымового слоя, особенно в помещениях с высокой теплопроводностью ограждающих конструкций [11-13].

Альтернативным подходом к исследованию процессов горения и распространения дыма является применение методов вычислительной гидродинамики (CFD), позволяющих, за счет решения системы уравнений Навье-Стокса, проводить численное моделирование процессов теплопереноса [14-17].



Особый интерес представляет использование специализированного программного комплекса *Fire Dynamics Simulator (FDS)* [18-19], позволяющего с высокой степенью детализации моделировать процессы горения и распространения дыма, учитывая факторы, такие как геометрия помещения, характеристики материалов и параметры вентиляции [20-21].

Целью исследования является оценка адекватности применения численных методов и методики ВНИИПО для различных сценариев развития пожара. Для достижения поставленной цели определены следующие задачи: рассчитать среднеобъемную температуру дымового слоя в помещении по методике ВНИИПО; создать и верифицировать *FDS*-модель распространения пожара; сравнить результаты, полученные расчетным путем и методом численного моделирования.

Материалы и методы

Геометрия рассчитываемого объекта была построена в программном комплексе *PyroSim*, которая является основой для создания модели пожара. Исходные данные для моделирования (рис. 1): длина коридора $L = 30$ м, площадь помещения с очагом пожара 50 м^2 , в качестве пожарной нагрузки было выбрано административное помещение: мебель+бумага с низшей рабочей теплотой сгорания 14 МДж/кг , линейная скорость распространения пламени $0,0420 \text{ м/с}$, удельная скорость выгорания $0,0129 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$. Размер ячейки у расчетной сетки принят $0,25 \times 0,25$. Размер дверных проемов 2×1 м. Объемный расход удаляемых продуктов горения – $20 \text{ 000 м}^3/\text{ч}$, компенсация удаляемых продуктов горения – $20 \text{ 000 м}^3/\text{ч}$, как для установившейся сбалансированной системы. В работе было применено 2 расчетные сетки. Количество ячеек в первой сетке составило 17280, во второй сетке – 24585, полное количество ячеек в модели – 41865.

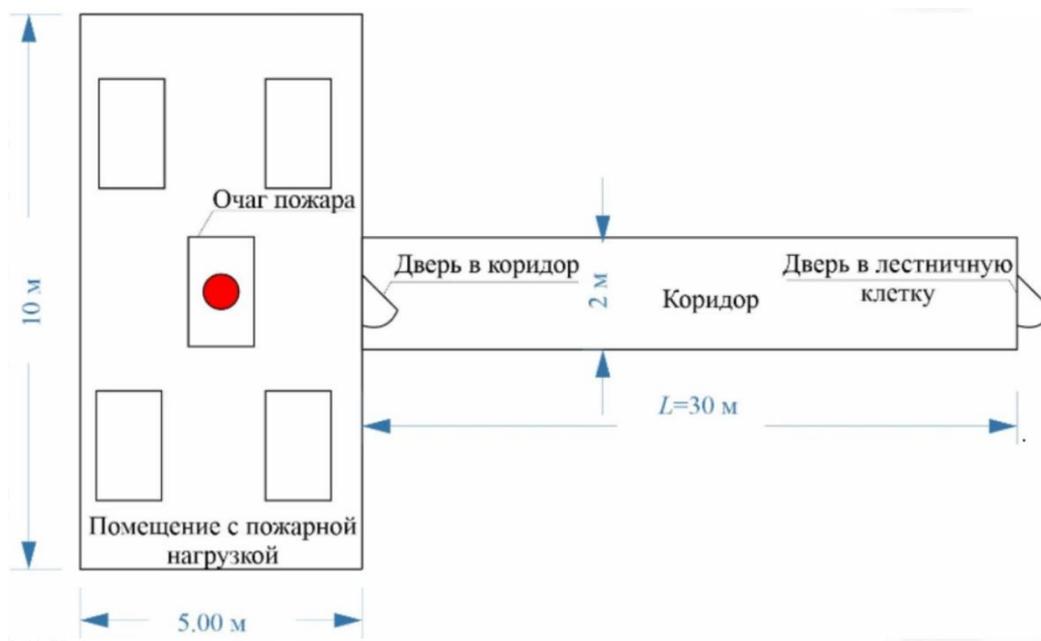


Рис. 1. Геометрические размеры рассчитываемой модели [20]



Результаты и обсуждение

В результате расчета по методике ВНИИПО и численного моделирования в программном комплексе *PyroSim* были сопоставлены расчетные температуры дымового слоя.

Расчет пожарной нагрузки и максимальной среднеобъемной температуры в горящем помещении офисной части здания

Удельная масса пожарной нагрузки:

$$m_{cp} = \frac{Q_f^p}{Q_n^p} = \frac{1000}{14} = 71,43 \text{ кг/м}^2 \quad (1)$$

где Q_f^p – плотность пожарной нагрузки, мДж/м²; Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания, мДж/кг.

Масса пожарной нагрузки:

$$M = m_{cp} F_f = 71,43 \cdot 50 = 3571,5 \text{ кг} \quad (2)$$

где F_f – площадь пола помещения, м².

Удельная приведенная пожарная нагрузка, отнесенная к площади пола помещения:

$$g_0 = \frac{M \sum m_i Q_{hi}^p}{F_f Q_{нд}^p} = \frac{3571,5 \cdot 14}{50 \cdot 13,8} = 72,46 \text{ кг/м}^2 \quad (3)$$

где $Q_{нд}^p$ – теплота сгорания древесины, мДж/кг; $m_i Q_{hi}^p$ – низшая теплота сгорания пожарной нагрузки, мДж/кг.

Удельная приведенная пожарная нагрузка, отнесенная к площади тепловоспринимающей поверхности:

$$g_k = \frac{M \sum m_i Q_{hi}^p}{(F_w - A_0) Q_{нд}^p} = \frac{3571,5 \cdot 14}{(190 - 2) \cdot 13,8} = 19,27 \text{ кг/м}^2 \quad (4)$$

где F_w – суммарная площадь внутренней поверхности ограждающих конструкций, м²; A_0 – суммарная площадь дверных проемов помещения, м².

Удельное критическое количество пожарной нагрузки:

$$g_{kp} = \frac{4500 \Pi^3}{1 + 500 \Pi^3} + \frac{V^{1/3}}{6V_0} = \frac{4500 \cdot 0,098^3}{1 + 500 \cdot 0,098^3} + \frac{150^{1/3}}{6 \cdot 3,68} = 3,12 \text{ кг/м}^2 \quad (5)$$

где $\Pi = \frac{\sum A_{0i} \cdot h_{0i}^{1/2}}{V^{2/3}}$ – проемность помещения, м^{1/2}; $V_0 = 0,263 \frac{\sum m_i Q_{hi}^p}{1000}$ –

удельное количество воздуха, необходимое для полного сгорания пожарной нагрузки помещения, м³/кг.

Для расчета средней температуры дымового слоя в коридоре определяется вид объемного пожара в смежных помещениях:

Согласно выполненным расчетам $g_k > g_{kp}$ – в помещении пожар, регулируемый вентиляцией (здесь и далее – ПРВ)

Максимальная среднеобъемная температура в горящем помещении:



$$T_{0\max} = T_r + 940 \exp(0,0047 g_0 - 0,141) =$$

$$= 20 + 940 \exp(0,0047 \cdot 72,46 - 0,141) = 1168 \text{ K} \quad (6)$$

Таким образом, в дальнейших расчетах принимаем значение максимальной среднеобъемной температуры в горящем помещении $T_{0\max} = 1168 \text{ K}$ или $895 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для определения температуры в потоке газов, вытекающем из горящего помещения в коридор, использовано соотношение вида:

$$T_0 = 0,8 T_{0\max} = 0,8 \cdot 1168 = 935 \text{ K} \quad (7)$$

Для определения усредненной температуры дымового слоя в коридоре используется следующая зависимость:

$$T_{sm} = T_a + 1,22 \frac{(T_0 - T_a)(2h_{sm} + A_c / l_c)}{l_c} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{0,58 l_c}{2h_{sm} + A_c / l_c}\right) \right] =$$

$$= 20 + 1,22 \frac{(935 - 20)(2 \cdot 0,5 + 60 / 30)}{30} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{0,58 \cdot 30}{2 \cdot 0,5 + 60 / 30}\right) \right] = 132^\circ\text{C} \quad (8)$$

Численное моделирование пожара позволило получить детальную картину распространения огня и термических потоков в заданном пространстве. Рис. 2 демонстрирует визуализацию динамики изменения температуры в различных точках помещения и коридора, прилегающего к нему.

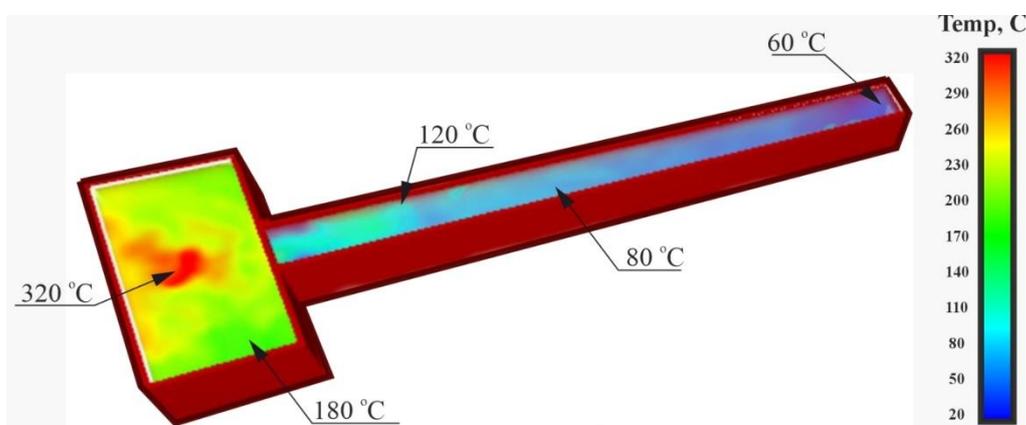


Рис. 2 Поля распределения температуры воздушного пространства расчетной модели на 10-ой минуте пожара

Поля распределения температуры в горящем помещении представляют собой сложную и динамичную картину. На рис. 2 видно, что в начальной стадии пожара температура вблизи источника возгорания быстро возрастает, формируя локализованный очаг тепла. Максимальная температура дымовых газов достигает 320°C . Затем, по мере распространения пламени, горячие газы поднимаются вверх, создавая слоистую структуру с градиентом температуры по высоте. Температура дыма в области дымоприемного устройства достигает 120°C .

Рис. 3 показывает, что в начальной стадии пожара температура повышается относительно медленно (интервал времени 0–100 секунд), по мере увеличения площади горения и вовлечения новых материалов в процесс.

Этот период характеризуется постепенным накоплением тепла, и температура может подниматься до нескольких сотен градусов Цельсия. По мере развития пожара, когда достигается стадия интенсивного горения, температура резко возрастает. В этот период доминируют процессы конвекции и теплового излучения, и температура может быстро достигать 800-1000°C, а в некоторых случаях и выше. Этот этап характеризуется экстремальной опасностью для жизни и здоровья людей, находящихся в помещении. После достижения пиковой температуры, она может постепенно снижаться, особенно если процесс горения начинает затухать из-за недостатка кислорода или выгорания топлива. Однако даже после этого температура остается высокой и представляет опасность.

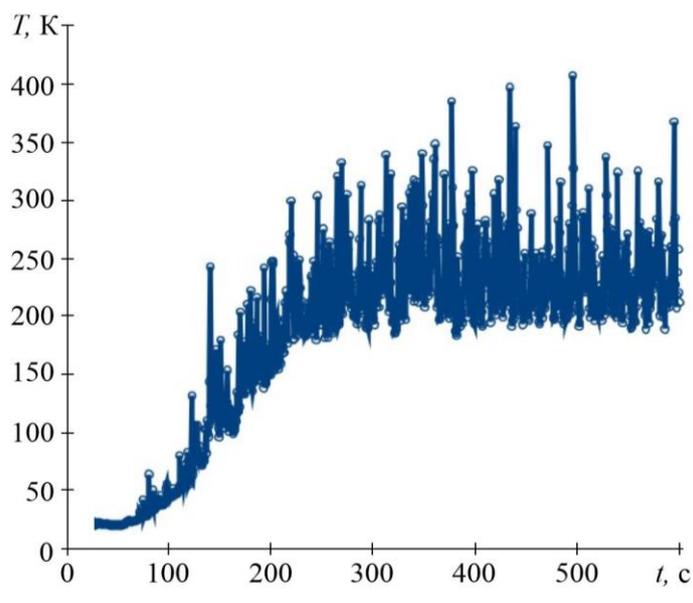


Рис. 3. График колебания температуры дымового слоя в горящем помещении на 10-й минуте пожара

Заключение

Было произведено сравнение температуры дымовых газов, полученной по эмпирическим зависимостям и упрощенным моделям, позволяющим оценить температуру дымового слоя на основе заданных параметров пожара и помещения, которая предоставляет методика ВНИИПО и *FDS* моделирования, которое адаптировано для моделирования пожаров. Расчет, выполненный по методике ВНИИПО, показал завышенную температуру 132°C, что приводит к увеличению расхода и нагрузку на систему дымоудаления, в то время как численное моделирование с использованием *FDS* продемонстрировало результат в 120°C.

Благодарность

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Расчет пожара регулируемого вентиляцией / Б. А. Агафанов, Р. Р. Сарчин, Л. Э. Осипова, Е. В. Варсегова. – Текст : электронный // Строительные конструкции, здания и сооружения. – 2022. – № 1(1). – С. 40–49. – EDN EEEFQU.
2. Maragkos, G. On the use of dynamic turbulence modelling in fire applications / G. Maragkos, V. Merci // Combustion and flame. – 2020. – № 216. – P. 9–23. – URL: <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2020.02.012>.
3. Ene, Iulian-Cristian. The influence of ventilation factors on the development of fires in rooms and buildings. Review of numerical studies / Ene, Iulian-Cristian & Iordache, Vlad & Becheru, Alexandru-George // Revista Romana de Inginerie Civila. – 2023. – № 14. – P. 96–106. – DOI 10.37789/rjce.2023.14.2.4.
4. Гилетич, А. Н. Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации противодымной вентиляции зданий после введения в действие Технического регламента о требованиях пожарной безопасности / А. Н. Гилетич, А. А. Косачев, Б. Б. Колчев. – Текст : электронный // Пожарная безопасность. – 2012. – № 3. – С. 126–130. – EDN PHSLHL.
5. Абашкин, А. А. Моделирование пожара в двухпутном перегонном тоннеле метрополитена / А. А. Абашкин, А. В. Карпов, И. Р. Хасанов. – Текст : электронный // Пожарная безопасность. – 2024. – № 4 (117). – С. 17–25. – DOI 10.37657/vniipr.pb.2024.117.4.001. – EDN DFNNGF.
6. Овчинникова, В. К. Анализ системы противопожарной защиты театра: проблемы и пути совершенствования / В. К. Овчинникова. – Текст : электронный // Вестник науки. – 2024. – Том 4, № 9 (78). – С. 582–589. – EDN GBEPV.
7. Голубцов, Р. К. Способы совершенствования систем противодымной вентиляции в торговых комплексах / Р. К. Голубцов. – Текст : электронный // Синтез науки и образования как механизм перехода к постиндустриальному обществу : сборник статей Международной научно-практической конференции, Самара, 12 декабря 2024 года. – Уфа : Омега Сайнс, 2024. – С. 25–28. – EDN ICUGGC.
8. Kolaitis, D. CFD - simulation of fire spreading in a residential building : the effect of implementing phase changing materials in european combustion meeting / D. Kolaitis, E. Asimakopoulou, M. Founti. – 2011. – P. 1–6.
9. Бройда, В. А. Аналитическое исследование работы естественной вытяжной системы вентиляции многоэтажного здания со стабилизаторами расхода воздуха в холодный период года / В. А. Бройда. – Текст : электронный // Известия КГАСУ – 2023. – № 1 (63). – С. 43–51. – DOI 10.52409/20731523_2023_1_43. – EDN IHKPHS.
10. Comprehensive Building Fire Risk Prediction Using Machine Learning and Stacking Ensemble Methods / Ahn, Seungil, Jinsub Won, Jangchoon Lee, Changhyun Choi. – 2024. – № 7(10): 336. – URL: <https://doi.org/10.3390/fire7100336>.
11. Examination of effects of indoor fires on building structures and people / Kuti, Rajmund & Zólyomi, Géza & Laszlo, Gabriella & Hajdu, Csaba & Környei, László & Hajdu, Flora // Heliyon. – 2022. – DOI 10.1016/j.heliyon.2022.e12720.
12. The Effect of Fire on Building Materials : the case-study of the varnakova monastery cells in central Greece / Delegou, Ekaterini & Apostolopoulou, Maria & Ntoutsis [et al.] // Heritage. – 2019. – № 2. – P. 1233–1259. – DOI 10.3390/heritage2020080.
13. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов / Ю. Н. Шебеко, Н. В. Смирнов, Н. Л. Полетаев [и др.]. – Текст : электронный // Пожарная безопасность. – 2012. – № 2. – С. 22–31. – EDN PJAAT.
14. Зиганшин, А. М. Компьютерное моделирование течения в симметричном вентиляционном тройнике круглого сечения на слияние / А. М. Зиганшин, С. В. Еремина. – Текст : непосредственный // Строительные конструкции, здания и сооружения. – 2023, № 1 (2). – С. 25–31.



15. Уваров, В. А. Численное исследование течения при конвекции воздуха в храме святого благоверного князя Александра Невского / В. А. Уваров, А. Г. Кочев, М. М. Соколов. – Текст : электронный // Известия КГАСУ. – 2024, № 2 (68). – С. 17–25. – DOI 10.48612/NewsKSUAE/68.2, EDN: CPNKAW.

16. Оценка степени риска аварийных ситуаций на магистральных нефтегазопроводах / О. Б. Барышева, Л. Э. Осипова, А. О. Барышева, Р. И. Галимзянов. – Текст : непосредственный // Строительные конструкции, здания и сооружения. – 2024, № 2 (7). – С. 15–21.

17. Хазов, П. А. Влияние уровня геометрической детализации компьютерной модели на результаты анализа аэродинамических процессов / П. А. Хазов, А. В. Симонов, Е. А. Чибакова. – Текст : электронный // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2024. – Том 21, № 11 (245). – С. 9–18. – DOI 10.14489/vkit.2024.11.pp.009-018. – EDN FNEDKD.

18. Agent-Based Modelling and Simulation for evacuation of people from a building in case of fire / Kasereka, Selain & Kasoro, Nathanael & Kyamakya [et al] // Procedia Computer Science. – 2018. – № 130. – DOI 10-17. 10.1016/j.procs.2018.04.006.

19. MakGrattan, K. B. Fire Dynamics Simulator. Version 5 : user's guide / MakGrattan, K. B., Hostikka Simo, Floyd J. E. – 2010. – P.1–186.

20. Дымоудаление из коридора прямолинейной конфигурации при разном расположении отверстий систем противодымной вентиляции / М. Э. Алёшин, Ф. Р. Гаязов, Ю. Р. Кареева, М. Б. Чухлова. – Текст : электронный // Известия КГАСУ. – 2024, № 4 (70). – С. 265–274. – DOI 10.48612/NewsKSUAE/70.23, EDN: SSTAPA.

21. Денисихина, Д. М. Расчет коэффициента воздухообмена методами математического моделирования параметров микроклимата / Д. М. Денисихина. – Текст : электронный // Известия КГАСУ. – 2023, № 4 (66). – С. 337–345. – DOI 10.52409/20731523_2023_4_337, EDN: WFGUKM.

KAREEVA Yulya Rustemovna¹, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of heat, gas supply and ventilation; ALYOSHIN Marsel Eduardovich², design engineer of the 2nd category; CHUKHLOVA Mariya Borisovna¹, research management analyst

COMPARISON OF THE CALCULATED AND ACTUAL AVERAGE VOLUME TEMPERATURE OF THE SMOKE LAYER

¹Kazan State University of Architecture and Engineering.

1, Zelenaya St., Kazan, 420043, Russia.

Tel.: +7(843) 510-46-01; fax: +7(843) 238-79-72; e-mail: kareeva@kgasu.ru

²Metropolis LLC

4, Mayakovsky St., Kazan, 420012, Russia, pom. № 1002, fl. 2, komn. № 1.

Tel: +7 (843) 211-03-72.

Key words: smoke ventilation, FDS, modeling, fire source, temperature of the gaseous medium, PyroSim, smoke extraction system, smoke extraction from the corridor.

The smoke ventilation system in the corridor of a rectilinear configuration was calculated, and the average temperature of the smoke layer was determined according to the calculation methodology of the All-Russian Research Institute of Fire Protection. The obtained data were then compared with the results of mathematical modelling using the PyroSim software package. These results enable us to evaluate the suitability of the numerical model



REFERENCES

1. Agafonov B. A., Sarchin R. R., Osipova L. E., Varsegova E. V. Raschet pozhara reguliruemogo ventilyaciey [Calculation of a fire controlled by ventilation] *Stroitelnye konstrukcii, zdaniya i sooruzheniya* [Construction, buildings and structures]. 2022, №1 (1), P. 40-49.
2. Maragkos, G., & Merci, B. (2020). On the use of dynamic turbulence modelling in fire applications. *Combustion and Flame*, 216, 9–23. <https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2020.02.012>.
3. Ene, Iulian-Cristian & IORDACHE, Vlad & Becheru, Alexandru-George. (2023). "The influence of ventilation factors on the development of fires in rooms and buildings. Review of numerical studies". *Revista Romana de Inginerie Civila/Romanian Journal of Civil Engineering*. 14. 96-106. 10.37789/rjce.2023.14.2.4.
4. Giletich A. N., Kosachev A. A., Kolchev B. B. Aktualnye problemy proektirovaniya i ehkspluatatsii protivodymnoy ventilyatsii zdaniy posle vvedeniya v dejstvie Tekhnicheskogo reglamenta o trebovaniyakh pozharney bezopasnosti [Actual problems of design and operation of smoke ventilation of buildings after the introduction of Technical regulations on fire safety requirements] *Pozharnaya bezopasnost* [Fire safety]. 2012, № 3, P. 126-130. – EDN PHSLHL.
5. Abashkin A. A., Karpov A. V., Khasanov I. R. Modelirovanie pozhara v dvukhputnom peregonnom tonnele metropolitena [Modeling of a fire in a double-track subway tunnel] *Pozharnaya bezopasnost* [Fire safety]. 2024, № 4(117), P. 17-25. – DOI 10.37657/vniipo.pb.2024.117.4.001. – EDN DFVNGF.
6. Ovchinnikova V. K. Analiz sistemy protivopozharney zashchity teatra: problemy i puti sovershenstvovaniya [Analysis of the theater fire protection system: problems and ways of improvement] *Vestnik nauki* [Bulletin of Science]. 2024, Vol. 4, № 9(78), P. 582–589. EDN GBEPV.
7. Golubcov R. K. Sposoby sovershenstvovaniya sistem protivodymnoy ventilyatsii v torgovykh kompleksakh [Ways to improve smoke ventilation systems in shopping malls] *Sitez nauki i obrazovaniya kak mekhanizm perekhoda k postindustrialnomu obshchestvu* [The synthesis of science and education as a mechanism for transition to a post-industrial society]: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Samara, 12 dekabrya 2024 goda. Ufa: OMEGA SAYNS, 2024, P. 25–28. – EDN ICUGGC.
8. Kolaitis D., Asimakopoulou E., Founti M. CFD Simulation of Fire Spreading in a Residential Building: The Effect of Implementing Phase Changing Materials. In *European Combustion Meeting*, pp. 1–6. 2011.
9. Broyda V. A. Analiticheskoe issledovanie raboty estestvennoy vytyazhnoy sistemy ventilyatsii mnogoetazhnogo zdaniya so stabilizatorami raskhoda vozdukh v kholodny period goda [Analytical study of the operation of a natural exhaust ventilation system of a multi-storey building with air flow stabilizers in the cold season] *Izvestiya KGASU* [News KSUAE]. 2023, № 1(63), P. 43–51. – DOI 10.52409/20731523_2023_1_43. – EDN IHKPHS.
10. Ahn, Seungil, Jinsub Won, Jangchoon Lee, and Changhyun Choi. 2024. "Comprehensive Building Fire Risk Prediction Using Machine Learning and Stacking Ensemble Methods" *Fire* 7, no. 10: 336. <https://doi.org/10.3390/fire7100336>.
11. Kuti, Rajmund & Zólyomi, Géza & Laszlo, Gabriella & Hajdu, Csaba & Környei, László & Hajdu, Flora. (2022). Examination of effects of indoor fires on building structures and people. *Heliyon*. 9. e12720. 10.1016/j.heliyon.2022.e12720.
12. Delegou, Ekaterini & Apostolopoulou, Maria & Ntoutsis, Ioanna & Thoma, Marina & Keramidis, Vasileios & Papatrechis, Christos & Economou, George & Moropoulou, A.. (2019). The Effect of Fire on Building Materials: The Case-Study of the Varnakova Monastery Cells in Central Greece. *Heritage*. 2. 1233–1259. 10.3390/heritage2020080.
13. Shebeko Yu. N., Smirnov N. V., Poletaev N. L., Gorshkov V.I., Shebeko A.Yu., Zuev S.A., Makeev V.I. Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov [Fire and explosion



hazard of substances and materials] *Pozharnaya bezopasnost* [Fire safety]. 2012, № 2, P. 22–31. – EDN PIJAIT.

14. Ziganshin A. M., Eremina S. V. *Kompyuternoe modelirovanie techeniya v simmetrichnom ventilyacionnom troynike kruglogo secheniya na sliyanie* [Computer simulation of flow in symmetrical ventilation tees of circular cross-section for fusion]. *Stroitelnye konstruktsii, zdaniya i sooruzheniya* [Building structures, buildings and structures]. 2023, № 1 (2), P. 25–31.

15. Uvarov V. A., Kochev A. G., Sokolov M. M. *Chislennoe issledovanie techeniya pri konveksii vozdukh v khrame svyatogo blagovernogo knyazya Aleksandra Nevskogo* [Numerical study of air convection flow in the Church of the Holy Blessed Prince Alexander Nevsky] *Izvestiya KGASU* [News KSUAE]. 2024, 2024, № 2 (68), P. 17–25, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.2, EDN: CPNKAW.

16. Barysheva O. B., Osipova L. E., Barysheva A. O., Galimzyanov R. I. *Otsenka stepeni riska avariynykh situatsiy na magistralnykh neftegazoprovodakh* [Assessment of the degree of emergency risk on oil and gas trunk pipelines] *Stroitelnye konstruktsii, zdaniya i sooruzheniya* [Construction, buildings and structures]. 2024, №2 (7). P. 15–21.

17. Hazov P. A., Simonov A. V., Chibakova E. A. *Vliyanie urovnya geometricheskoy detalizatsii kompyuternoy modeli na rezultaty analiza aehrodinamicheskikh processov* [The influence of the level of geometric detail of the computer model on the results of the analysis of aerodynamic processes] *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of Computer and Information Technologies]. 2024, Vol. 21, № 11(245), P. 9-18. – DOI 10.14489/vkit.2024.11.pp.009-018. – EDN FNEDKD.

18. Kasereka, Selain & Kasoro, Nathanael & Kyamakya, Kyandoghere & Goufo, Emile-Franc & Chokki, Paterné & Yengo, Maurice. (2018). *Agent-Based Modelling and Simulation for evacuation of people from a building in case of fire*. *Procedia Computer Science*. 130. 10-17. 10.1016/j.procs.2018.04.006.

19. McGrattan, K. B. & Hostikka, Simo & Floyd, J. E. (2010). *Fire Dynamics Simulator (Version 5): User's Guide*. 1019. 1–186.

20. Aleshin M. E., Gayazov F. R., Kareeva Yu. R., Chukhlova M. B. *Dymoudalenie iz koridora pryamolineynoy konfiguratsii pri raznom raspolozhenii otverstiy sistem protivodymnoy ventilyatsii* [Smoke removal from a rectilinear corridor with different locations of the smoke ventilation system openings] *Izvestiya KGASU* [News KSUAE], 2024, №4 (70), P. 265-274, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.23, EDN: SSTAPA.

21. Denisikhina D. M. *Raschet koehfficienta vozdukhoobmena metodami matematicheskogo modelirovaniya parametrov mikroklimata* [Calculation of the air exchange coefficient based on CFDsimulation methods] *Izvestiya KGASU* [News KSUAE]. 2023, № 4(66), P. 337-345, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_337, EDN: WFGUKM.

© Ю. Р. Кареева, М. Э. Алешин, М. Б. Чухлова, 2025

Получено: 06.05.2025 г.