

УДК 614.849

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПЕРЕНОСНОМ УСТРОЙСТВЕ ПРОГРЕВА ИНТУМЕСЦЕНТНЫХ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Бельшина Юлия Николаевна¹, Цыганков Михаил Сергеевич^{1,2}, Ян Лун Никита^{2,3}

¹ Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

³ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. В статье проанализирована актуальная проблема отсутствия полевого метода исследования огнезащитных вспучивающихся покрытий для металлических конструкций. Установлено, что металлические конструкции теряют свою несущую способность в ходе пожара и должны быть обработаны качественными огнезащитными составами. Описаны характеристики разработанного прототипа устройства, используемого для проведения проверки качества огнезащитной обработки непосредственно на объекте защиты. Проведено моделирование условий работы переносного устройства прогрева огнезащитных красок интумесцентного типа. Выбраны два наиболее значимых показателя, влияющих на коэффициент полезного действия прототипа устройства. Определена зависимость температуры сердечника от подводимой средней и максимальной теплоты, а также зависимость температуры на выходе из устройства от скорости и теплового потока. Произведена оценка результатов моделирования путем проверки при помощи теплового баланса. Подтверждена эффективность полученной оптимальной 3D-модели посредством математического расчета теплообмена. Определена необходимость разработки технического регламента на устройство для проведения исследований с целью решения задач по идентификации интумесцентных огнезащитных составов.

Ключевые слова: металлические конструкции, вспучивающиеся огнезащитные покрытия, теплообмен, моделирование, пожарная безопасность

Для цитирования: Бельшина Ю. Н., Цыганков М. С., Ян Лун Никита. Моделирование теплообмена в переносном устройстве прогрева интумесцентных огнезащитных покрытий // Техносферная безопасность. 2025. № 2 (47). С. 38–46.

SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN A PORTABLE DEVICE HEATING OF INTUMESCENT FLAME-RETARDANT COATINGS

Yulia N. Belshina¹, Mikhail S. Tsygankov^{1,2}, Nikita Yan Lun^{2,3}

¹ Saint-Petersburg University of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

³ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. The article analyzes the current problem of the lack of a field method for studying flame-retardant intumescent coatings for metal structures. It is established that metal structures lose their bearing capacity during a fire and must be treated with high-quality flame retardant compounds. The characteristics of the developed prototype device used to check the quality of flame retardant treatment directly at the protected object are described. The simulation of the operating conditions of a portable device for heating intumescent flame-retardant paints is carried out. Two of the most significant indicators affecting the efficiency of the prototype device are selected. The dependence of the core temperature on the supplied average and maximum heat is determined, as well as the dependence of the temperature at the device outlet on the speed and heat flow. The simulation results were evaluated by checking with the help of thermal balance. The efficiency of the obtained optimal 3D model is confirmed by mathematical calculation of heat transfer. The necessity of developing technical regulations for a device for conducting research in order to solve problems related to the identification of intumescent flame retardants is determined.

Keywords: metal structures, flame-retardant intumescent coatings, heat transfer, modeling, fire safety

For Citation: Belshina Y. N., Tsygankov M. S., Yan Lun Nikita. Simulation of heat transfer in a portable device heating of intumescent flame-retardant coatings // *Technospheric safety*. 2025. № 2 (47). pp. 38–46.

Введение

Даже самые прочные и надежные строительные материалы не способны долго выдерживать воздействие высоких температур, и часто случается так, что разрушение здания происходит еще до приезда пожарных подразделений. Наиболее распространенным материалом, используемым для возведения несущих конструкций различного рода строений, является сталь, которая в условиях пожара (при температуре свыше 500 °C) может сохранять свою прочность и несущую способность не более 15 мин, что значительно увеличивает вероятность разрушения объекта [1].

Для предотвращения воздействия высоких температур на конструкции здания используются огнезащитные составы, на-

пример вспучивающиеся огнезащитные покрытия, которые с точки зрения рисков некачественного применения являются наиболее опасными. Это связано с тем, что принцип их действия заключается в многократном увеличении толщины огнезащитного покрытия при воздействии высокой температуры [2–4].

Учитывая, что в настоящее время существующие методики [5, 6] не обладают полевыми (портативными) приборами для проверки вспучивающей способности огнезащитного покрытия для металлоконструкций, смонтированного непосредственно на объекте защиты, авторами настоящей статьи был разработан прототип такого устройства [7], но для повышения коэффициента полезного действия необходимо провести моделирование и установить, какие же

характеристики узлов и агрегатов устройства будут приближены к идеальным.

Расчетная схема

Авторами статьи было проведено исследование характеристик устройства двустороннего прогрева интумесцентных огнезащитных покрытий. Моделирование было сделано в вычислительном пакете Ansys Fluent. На рис. 1 показана расчетная схема. Установка представляет собой керамическую трубку внутренним диаметром $d = 15,9$ мм

и длиной $L = 150$ мм. Внутри нее установлен стальной сердечник, который нагревается токами высокой частоты. Принцип этого процесса основан на создании вихревых токов в нагреваемой детали, а т. к. металл оказывает значительное сопротивление проходящему через него электрическому току, то происходит нагрев посредством поглощения энергии поля излучателя. Описанная схема моделировалась граничными условиями второго рода, был задан постоянный тепловой поток, который меняли в пределах от $q = 15\,000$ Вт/м² до $q = 25\,000$ Вт/м² на стенке сердечника.

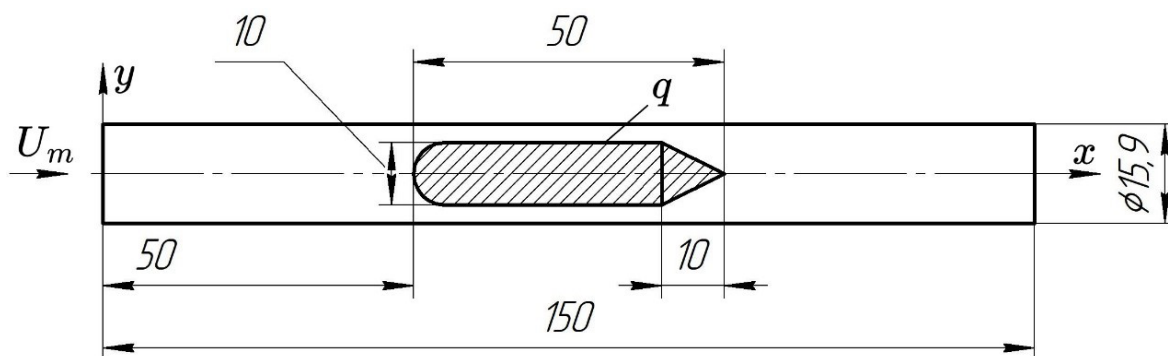


Рис. 1. Расчетная схема установки (размеры указаны в мм)

Fig. 1. Design scheme of the installation (dimensions are given in mm)

Кроме тепловых потоков менялись скорости на входе в устройство. Рассмотрены случаи $um = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 4,0$ м/с.

Сердечник представляет собой цилиндр с минимальным диаметром 10 мм, в передней части которого располагается полусфера диаметром 10 мм, а в задней части — конус высотой 10 мм. Общая длина объекта равна 50 мм.

Детали моделирования

Для решения уравнений RANS построена структурированная вычислительная сетка.

Задача решалась в осесимметричной постановке. По радиусу располагалось 30 расчетных узлов. Было произведено их сгущение к стенкам канала, что позволило откорректировать определение скоростей и температур.

Выбрана модель турбулентности $k-\omega$ -BSL для случая со скоростью $um = 4$ м/с и $um = 2$ м/с, остальные скорости посчитаны при помощи ламинарной модели. Решение получено за 150 итераций, при этом все невязки менее 10^{-7} , что является достаточно точным результатом. Из моделированных 25 различных случаев было рассчитано среднее значение.

Результаты моделирования

На рис. 2 показано поле осевой скорости в устройстве. Сердечник является плохо обтекаемым телом, поэтому на нем происходит отрыв потока. За сердечником можно видеть зону возвратного течения газа, скорость в которой составляет примерно 1 м/с. Обычно в зоне возвратного течения наблюдается ухудшение теплообмена, следовательно, на конусе температура поверхности

сердечника будет выше, чем на цилиндрической или на полусферической частях.

На рис. 3 показано распределение температуры по сечению устройства. Видно, что при обтекании цилиндрической части тепловой пограничный слой возрастает, при этом на выходе он достигает примерно половины кольцевого зазора. Затем после отрыва пограничного слоя на конусной части температура достигает 1 180 К. За сердечником устройство можно условно разделить

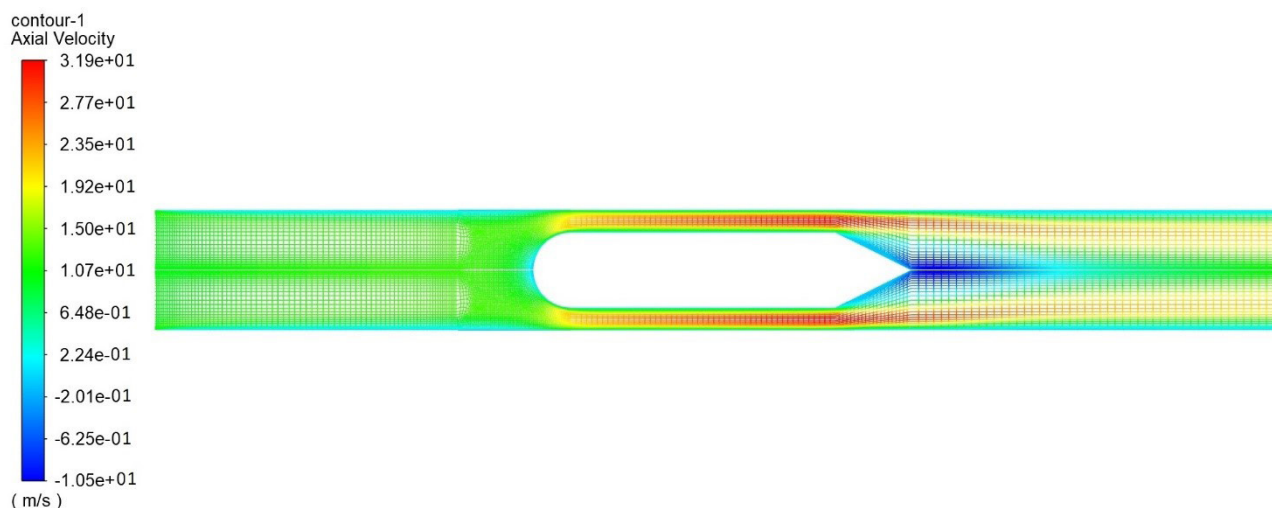


Рис. 2. Поле осевой скорости u_x при $u_m = 1$ м/с и $q = 20\,000$ Вт/м²

Fig. 2. Axial velocity field u_x at $u_m = 1$ m/s and $q = 20\,000$ W/m²

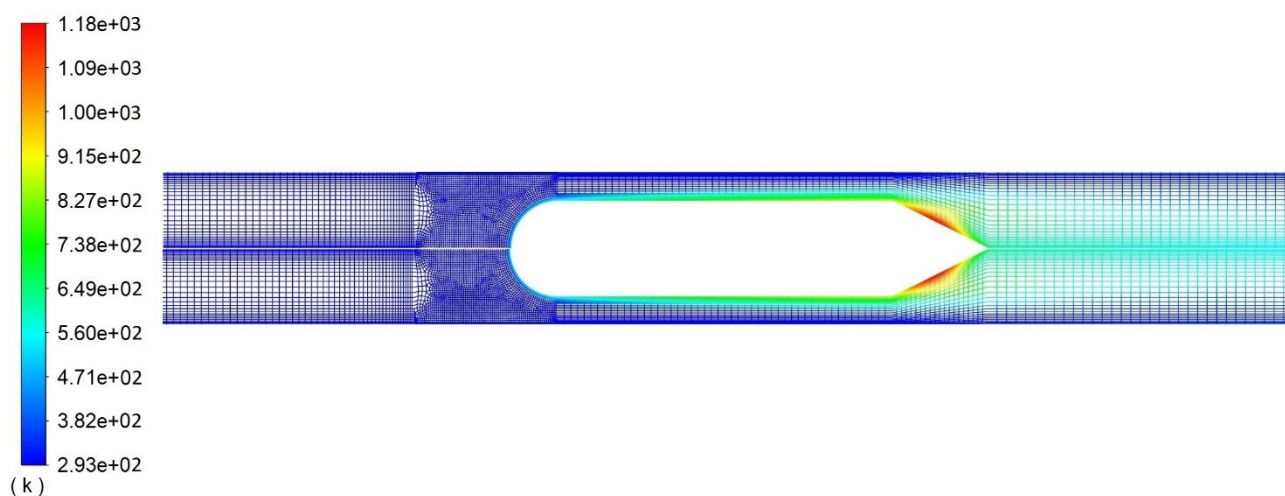


Рис. 3. Поле температуры при $u_m = 1$ м/с и $q = 20\,000$ Вт/м²

Fig. 3. Temperature field at $u_m = 1$ m/s and $q = 20\,000$ W/m²

на две части (горячая сердцевина и относительно холодная пристенная часть). Такое распределение температур хорошо с точки зрения эксплуатации устройства, т. к. керамическая трубка будет испытывать меньшие термические деформации.

На рис. 4а изображена зависимость температуры на выходе из устройства

от величины входной скорости u_{in} . Можно заметить, что для всех случаев при увеличении скорости выходная температура воздуха из устройства снижается. Если при 0,5 м/с выходная температура может достигать 500–600 К, то для 4 м/с эта величина не превышает 350 К, что является следствием закона сохранения энергии, о чем

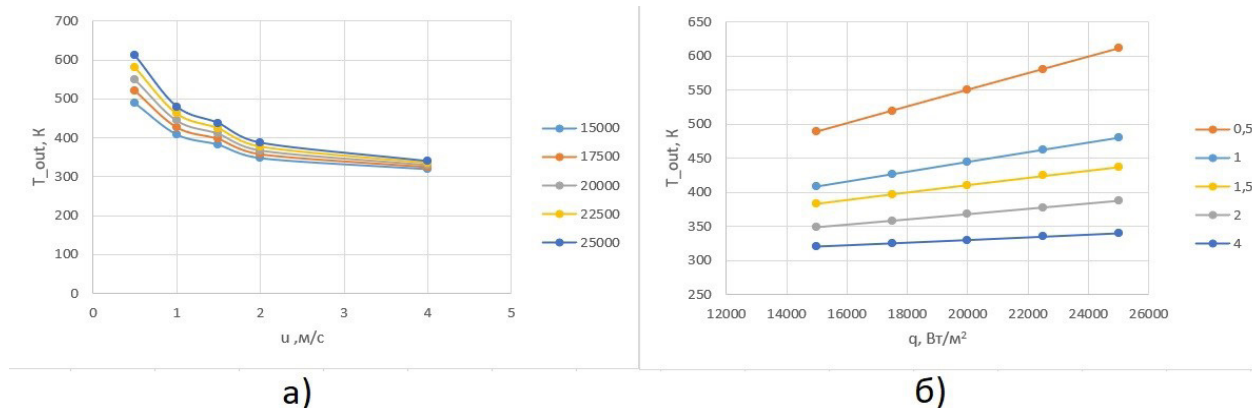


Рис. 4. Зависимость температуры на выходе из устройства от: а) скорости; б) теплового потока на сердечнике

Fig. 4. Dependence of the temperature at the outlet of the device on: a) velocity; b) heat flow at the core

будет сказано далее. На рис. 4б показано, как изменяется температура при увеличении теплового потока. Для всех опытов свойственна линейная зависимость температуры на выходе из устройства от величины теплового потока через сердечник. С практической точки зрения это означает, что, повышая мощность токов высокой частоты, можно эф-

фективно регулировать температуру на выходе из устройства.

Сердечник разогревается до достаточно высокой температуры, поэтому одна из задач — контролировать его максимальную температуру, чтобы исключить отжиг и плавление металла. На рис. 5а показана средняя температура, которая необходима для

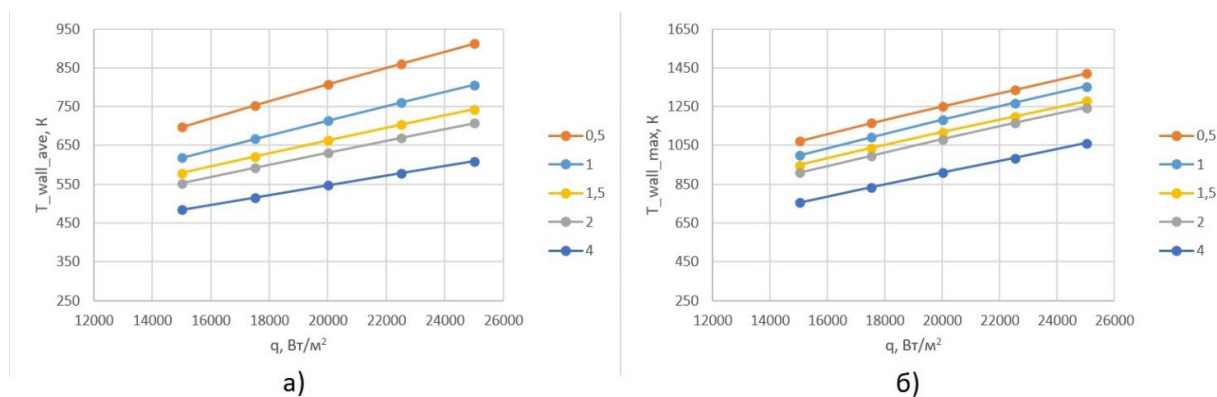


Рис. 5. Зависимость температуры сердечника от подводимой теплоты: а) средней; б) максимальной

Fig. 5. Dependence of the core temperature on the input heat: a) average; b) maximum

теплового баланса, а на рис. 5б показана максимальная температура сердечника. Для всех опробованных режимов температура на поверхности сердечника не превы-

шает температуру плавления стали. Это говорит нам о том, что при использовании таких режимов имеется возможность долгосрочной эксплуатации устройства.

Оценка моделирования при помощи теплового баланса [8, 9]

Теплота, передаваемая потоку от сердечника:

$$Q_1 = q \cdot S \cdot t, \quad (1)$$

где:

S — площадь поверхности сердечника;

t — время теплового воздействия.

Теплота, воспринимаемая воздухом:

$$Q_2 = G \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot t, \quad (2)$$

где:

G — массовый расход воздуха;

c_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении;

ΔT — разность температур между входным и выходным сечениями.

Если предположить, что вся энергия нагрева сердечника расходуется на нагрев воздуха, то:

$$Q_1 = Q_2. \quad (3)$$

Следовательно, разность температур между входным и выходным сечением равна:

$$\Delta T = \frac{q \cdot S}{G \cdot c_p}. \quad (4)$$

Становится понятно, что разность температур прямо пропорциональна тепловому потоку и обратно пропорциональна расходу газа. Этот результат соответствует результату, полученному при моделировании через программное обеспечение Ansys.

Так, для $u_m = 1$ м/с и $q = 20\,000$ Вт/м² моделированием получена разность температур $\Delta T = 444,4 - 293 = 151,4$ [K].

Проведя параллельно проверку математическим методом, получаем:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,010}{2}\right)^2 + \pi \cdot 0,010 \cdot 0,035 + \pi \cdot \left(\frac{0,010}{2}\right) \cdot \sqrt{\left(\frac{0,010}{2}\right)^2 + 0,010^2} \\ S = 0,001432 \text{ [м}^2\text{]} \\ \Delta T = \frac{q \cdot S}{G \cdot c_p} = \frac{20000 \cdot 0,001432}{(0,2392 \cdot 10^{-3}) \cdot 1005} = 119,2 \text{ [K]} \quad (5)$$

В качестве вывода по проведенному расчету можно отметить, что программное обеспечение Ansys, используемое для моделирования, завышает температуру на выходе из аппарата примерно на 27 %. Это нужно учитывать при проведении опытов, основанных на результатах моделирования.

Заключение

Отсутствие полевого метода исследования огнезащитных покрытий для металлоконструкций является актуальной проблемой. В настоящей статье проведено моделирование 25 различных случаев, в которых варьировали скорость и тепловой поток. Показано, что температура на выходе из устройства прямо пропорциональна тепловому потоку на сердечнике. Такой вывод можно получить как при моделировании, так и при оценке с использованием расчета теплового баланса.

С точки зрения разработчика устройства это означает, что можно поставить регулятор на источник тока высокой частоты и при этом получать желаемую температуру посредством изменения его мощности. Также была получена зависимость температуры на выходе из устройства от скорости воздушного потока. Увеличение скорости приводит к уменьшению температуры на выходе из устройства, но слишком низкая скорость тоже является нежелательной, т. к. при уменьшении этого показателя страдает теплопередача, поэтому в качестве разумного компромисса рекомендуется применять скорость не выше 1 м/с.

На основе полученных результатов авторами статьи предлагается подробнее рассмотреть вопрос о разработке технического регламента на устройство для проведения исследований такого рода с целью решения задач по идентификации интумесцентных огнезащитных составов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Теплофизические характеристики стали и огнезащитных покрытий при нормированных температурных режимах пожара / В. И. Голованов [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2023. № 4. С. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.25257/FE.2023.4.69-78>. EDN TNQLBQ.
2. Павлович А. В., Дринберг А. С., Машляковский Л. Н. Огнезащитные вспучивающиеся лакокрасочные покрытия. М. : ЛКМ-пресс, 2018. 488 с. EDN WVOIPP.
3. Guo-Qiang, Li, Ling-Ling, Wang, Qing, Xu, Jun-Wei, Ge. Intumescent coating and fire protection of steel structures. First edition. Boca Raton : CRC Press, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003287919>.
4. Зыбина О. А., Варламов А. В., Мнацаканов С. С. Проблемы технологии коксообразующих огнезащитных композиций. Новосибирск : ЦРНС, 2010. 50 с.
5. ГОСТ Р 59637–2021. Средства противопожарной защиты зданий и сооружений. Средства огнезащиты. Методы контроля качества огнезащитных работ при монтаже (нанесении), техническом обслуживании и ремонте : нац. стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 24 августа

2021 г. № 790-ст : введен впервые : дата введения 2021-09-15 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180684> (дата обращения: 03.05.2025).

6. ГОСТ Р 53295–2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности : нац. стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие приказом Федер. агентства по техн. регулированию и метрологии от 18 февраля 2009 г. № 71-ст : введен впервые : дата введения 2010-01-01 // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200071913?ysclid=ma7tav0m1r139957109> (дата обращения: 03.05.2025).

7. Патент № 227281 U1 Российская Федерация, МПК G01N 25/72, G01N 25/50. Переносное устройство для прогрева интумесцентных красок огнезащитного типа : № 2024107154 : заявл. 14.03.2024 : опубл. 15.07.2024 / М. С. Цыганков // Google Patents : сайт. URL: <https://patents.google.com/patent/RU227281U1/ru> (дата обращения: 03.05.2025).

8. Пилипенко Н. В. Тепловые потери и энергетическая эффективность зданий и сооружений : учебное пособие. СПб. : изд-во ун-та ИТМО, 2016. 54 с.

9. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. 3-е изд., репр. Москва : Бастет, 2010. EDN QMKZMJ.

REFERENCES

1. Thermophysical characteristics of steel and fireproof coatings under normalized fire temperature conditions / V. I. Golovanov et al. // Fires and emergencies: prevention, elimination. 2023. № 4. pp. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.25257/FE.2023.4.69-78>. EDN TNQLBQ.

2. Pavlovich A. V., Drinberg A. S., Mashlyakovskiy L. N. Fire-protective blowing paint coatings. М. : LKM-press, 2018. 488 p. EDN WVOIPP.

3. Guo-Qiang, Li, Ling-Ling, Wang, Qing, Xu, Jun-Wei, Ge. Intumescent coating and fire protection of steel structures. First edition. Boca Raton : CRC Press, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003287919>.

4. Zybina O. A., Varlamov A. V., Mnatsakanov S. V. Problems of technology of coke-forming flame retardant compositions. Novosibirsk : CRNS, 2010. 50 p.

5. GOST R 59637–2021. Means of fire protection of buildings and structures. Fire protection means. Methods of quality control of fire protection works during installation (application), maintenance and repair : national standard of the Russian Federation : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from August 24, 2021 № 790-st : introduced for the first time : date of introduction 2021-09-15 // Codex : electronic fund of legal and normative-technical information. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200180684> (date of application: 03.05.2025).

6. GOST P 53295–2009. Fire protection means for steel structures. General requirements. Method of determination of fire protection efficiency : national standard of the Russian Federation : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology from February 18, 2009 № 71-st : introduced for the first time : date of introduction 2010-01-01 //

Codex : electronic fund of legal and normative-technical information. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200071913?ysclid=ma7tav0m1r139957109> (date of application: 03.05.2025).

7. Patent № 227281 U1 Russian Federation, MPK G01N 25/72, G01N 25/50. Portable device for heating of intumescent paints of fire-retardant type : № 2024107154 : applied for. 14.03.2024 : published 15.07.2024 / M. S. Tsygankov // Google Patents : website. URL: <https://patents.google.com/patent/RU227281U1/ru> (date of application: 03.05.2025).

8. Pilipenko N. V. Heat losses and energy efficiency of buildings and structures : textbook. SPb. : ed. of ITMO University, 2016. 54 p.

9. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. Fundamentals of heat transfer. 3rd ed., rep. M. : Bastet, 2010. EDN QMKZMJ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бельшина Юлия Николаевна, канд. техн. наук, доц., старший научный сотрудник отдела инструментальных методов и технических средств экспертизы пожаров НИИ перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149); SPIN-код: 2179-4907, AuthorID: 273083; e-mail: belshina.y@igps.ru

Цыганков Михаил Сергеевич, адъюнкт Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 149); SPIN-код: 7154-4897; e-mail: 33mixon33@mail.ru

Ян Лун Никита, инженер института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр-кт Академика Лаврентьева, д. 1); Scopus ID: 59471135200; ORCID: 0009-0008-2409-8483; yn1999@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yulia N. Belshina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher of the Department of Instrumental Methods and Technical Means of Fire Forensics, Research Institute of Advanced Research and Innovative Technologies in the Field of Life Safety, St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Avenue, St. Petersburg, 196105, Russian Federation); SPIN-code: 2179-4907, AuthorID: 273083; e-mail: belshina.y@igps.ru

Mikhail S. Tsygankov, Adjunct St. Petersburg University of the State Fire Service of EMERCOM of Russia (149 Moskovsky Avenue, St. Petersburg, 196105, Russian Federation); SPIN-code: 7154-4897; e-mail: 33mixon33@mail.ru

Nikita Yan Lung, an engineer at the Institute of Thermophysics named C. C. Kutateladze SB RAS (1 Akademika Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Scopus ID: 59471135200; ORCID: 0009-0008-2409-8483; e-mail: yn1999@mail.ru

Поступила в редакцию 29.03.2025
Одобрено после рецензирования 08.04.2025
Принята к публикации 15.06.2025