



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 666.9-13 : 691.335

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-21-30

Моделирование процесса прогрева строительной конструкции с защитным огнестойким покрытием

С.В. Гергишан, А.А. Овчинников*, И.А. Ходова

Сергей Васильевич Гергишан, Александр Александрович Овчинников*, Ирина Анатольевна Ходова

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Иваново, Российская Федерация

gergishmpower@mail.ru, nisigasa@mail.ru, hodova_irina@bk.ru



Рассматриваются вопросы повышения огнестойкости железобетонных строительных конструкций промышленных предприятий. Приведены данные о пожарах на промышленных предприятиях и объектах инфраструктуры, анализируется нанесенный ущерб. Предлагается авторская методика повышения огнестойкости конструкций путем нанесения на их поверхность защитных покрытий. При помощи программного средства ELCUT 6.6 проведены численные эксперименты для нестационарного теплопереноса при пожаре в закрытом помещении. Моделирование процесса прогрева плиты перекрытия доказывает эффективность применения огнезащитного покрытия, при этом огнестойкость конструкции повышается в четыре раза.

Ключевые слова: строительные конструкции, защитное покрытие, пожары, моделирование процесса прогрева, повышение огнестойкости

Для цитирования:

Гергишан С.В., Овчинников А.А., Ходова И.А. Моделирование процесса прогрева строительной конструкции с защитным огнестойким покрытием // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6, вып. 1. С. 21-30. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-21-30



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-21-30

Modelling of the heating process of a building structure with a protective fire-resistant coating

S.V. Gergishan, A.A. Ovchinnikov*, I.A. Khodova

Sergey Vasilyevich Gergishan, Aleksandr Aleksandrovich Ovchinnikov*, Irina Anatolyevna Khodova

Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Ivanovo, Russian Federation

gergishmpower@mail.ru, nisigasa@mail.ru, hodova_irina@bk.ru



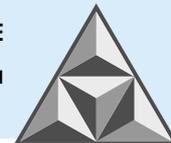
The paper considers the issues of increasing the fire resistance of reinforced concrete building structures of industrial enterprises. The authors provide data on fires at industrial enterprises and infrastructure facilities and analyse the damage caused. The paper offers the author's method of increasing the fire resistance of structures by applying protective coatings to their surface. The authors have performed numerical experiments for unsteady heat transfer in an indoor fire using the ELCUT 6.6 software tool. Modelling of the floor slab heating process proves the effectiveness of the fire protection coating, with a fourfold increase in the fire resistance of the structure.

Keywords: building structures, protective coating, fires, modelling of the heating process, fire resistance improvement

For citation:

Gergishan S.V., Ovchinnikov A.A., Khodova I.A. Modelling of the heating process of a building structure with a protective fire-resistant coating // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 1. P. 21-30. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-21-30



ВВЕДЕНИЕ

По данным Государственной противопожарной службы МЧС Российской Федерации, количество пожаров на промышленных предприятиях не снижается. Хотя в процентном соотношении гибель людей на пожарах за 2023 год на таких объектах составила лишь 1.3%, прямой материальный ущерб от пожаров является внушительным – около 20% в исчислении от общего ущерба [1]. Таким образом, повышение пожарной безопасности в производстве возводимых строительных объектов, как и ранее, требует активного решения.

Основными причинами пожаров являются неосторожное обращение с огнем и аварийный режим работы электротехнических установок в промышленных зданиях и сооружениях. В условиях проведения специальной военной операции возросло число пожаров на объектах топливно-энергетического комплекса Российской Федерации, возникающих в результате атак беспилотных средств поражения.

Пожары на опасных производственных объектах требуют особого внимания. Они не только создают риск жизни для работников, но и уничтожают оборудование, приводят к необратимым повреждениям капитальных строений. Для повышения огнестойкости строительных конструкций, обеспечения нераспространения огня и даже полной защиты зданий и сооружений от пожара применяют огнезащитные покрытия и футеровки. Применение таких покрытий позволяет избежать локальных возгораний, распространения огня, а также повреждения и разрушения строительных конструкций в результате высокотемпературного воздействия пламени и теплового излучения. Разработка защитных покрытий, а также оценка, диагностика и прогнозирование повышения огнестойкости строительных конструкций при их применении является актуальной научной задачей.

Приведем несколько примеров крупных пожаров на промышленных предприятиях в Российской Федерации, зафиксированных в России за последние два года [2]:

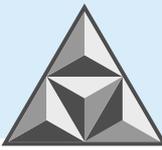
– 8 августа 2023 г. в Ковровском районе Владимирской обл. на предприятии по производству акриловых ванн возник пожар. Его площадь составила 4.1 тыс. м². По данным регионального Главного управления МЧС, эвакуированы 200 чел.; пострадавших в результате инцидента нет. Причиной пожара стал аварийный режим работы электросети;

– 15 декабря 2023 г. в поселке Бобровском Сысертского городского округа в Свердловской обл. загорелась кровля производственного цеха на площади 1.3 тыс. м². Из здания эвакуированы 40 чел. По данным регионального Главного управления МЧС, пострадавших при пожаре нет;

– 17 января 2024 г. в Шахтах Ростовской обл. произошел пожар на заводе «Авангард» в цехе по производству наполнителей для матрасов и подушек на площади 360 м². В результате происшествия пострадали 10 чел., при этом шестеро из них были госпитализированы.

Такие пожары на промышленных предприятиях и строительных объектах приводят к колоссальному материальному ущербу, причиняют вред жизни и здоровью наших соотечественников.

Наиболее распространенным строительным материалом, применяемым для промышленного и жилищного строительства, является железобетон. Огнестойкость железобетонных строительных конструкций определяется многими факторами и для стандартных элементов находится в пределах R45–R90. Основными факторами, оказывающими влияние на огнестойкость здания или сооружения в целом, являются габаритные параметры отдельных элементов, эксплуатационные нагрузки, толщина защитного слоя бетона, его вид и влажность, тип арматуры, параметры окружающей среды и др. [3].



Наиболее опасными железобетонными конструкциями при пожаре являются изгибаемые элементы перекрытия. Если пожар протекает под такими конструкциями, именно в перекрытиях быстрее всего достигаются температуры, приводящие к потере несущей способности и как следствие обрушению. При этом, если перекрытия являются жестким диском связи, обеспечивающим устойчивость здания, обрушение перекрытий приведет к разрушению здания в целом, даже если пожар локализован в одном помещении. Поэтому к таким элементам предъявляют требование повышенной огнестойкости – не ниже REI 60 [4].

Железобетон является композиционным материалом, где одновременно на восприятие нагрузок работают и бетон, и металлическая арматура. При этом бетон несет нагрузки на сжатие, а арматура – нагрузки на растяжение. При высокотемпературном воздействии тяжелый бетон на портландцементе интенсивно дегидратирует и разрушается в результате повторной гидратации свободной извести уже после ликвидации пожара [5]. Разрушение железобетонных конструкций, особенно изгибаемых, происходит в результате потери несущей способности металлической арматуры при достижении критической температуры [6]. Например, для балочной плиты перекрытия высотой 160 мм, длиной 5500 мм и шириной 1200 мм (из тяжелого бетона класса В25, с арматурой класса А400 Ø16 и защитным слоем 15 мм) временная длительно действующая нагрузка равна 6500 Па; критическая температура для арматуры составляет 560°C [7].

Значительное повышение огнестойкости типовых железобетонных конструкций может быть достигнуто при использовании огнезащитных покрытий различной природы. Наиболее перспективными являются покрытия на основе жаростойких вяжущих веществ, обеспечивающие высокую адгезию, огнеупорность и термостойкость; при этом сохраняются высокая прочность и низкая теплопроводность. В качестве одного из вариантов покрытия исследованы характеристики жаростойкого бетона на основе жидкого стекла с шамотным наполнителем [8-10].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эффективность применения огнестойких покрытий можно оценить с использованием математического моделирования процесса нагрева конструкции с покрытием и без такового. Моделирование в данной работе осуществляли при помощи программного комплекса ELCUT 6.6.

Температурный режим для решения нестационарной задачи теплопередачи определяли согласно п. 6 ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования»:

$$T - T_0 = 345 \lg(8 \tau + 1), \quad (1)$$

где T – температура среды, соответствующая времени τ , °C;

T_0 – температура среды до начала теплового воздействия (принимают равной температуре окружающей среды), в обычных условиях она составляет 20°C;

τ – время, исчисляемое от начала испытания, мин.

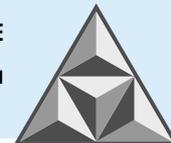
При моделировании распределения тепловых полей использовали уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q(T) - c(T) p \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где T – температура;

τ – время;

$\lambda_x(y, z)$ – компоненты тензора теплопроводности (в линейной постановке);



$\lambda(T)$ – теплопроводность как функция температуры, представленная кубическим сплайном (анизотропия не поддерживается в нелинейной постановке);

$q(T)$ – удельная мощность тепловыделения; в линейной постановке – константа, в нелинейной постановке – функция температуры, задаваемая кубическим сплайном;

$c(T)$ – удельная теплоемкость материала конструкции; в нелинейном случае – функция температуры, аппроксимированная кубическими сплайнами;

ρ – плотность материала конструкции.

Граничные условия теплового потока с нагреваемой стороны заданы суммой потоков, создаваемых конвекцией (3) и радиацией (4).

Конвекция

$$F_n = \alpha (T - T_0), \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи ($25 \text{ Вт} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$);

T_0 – температура окружающей среды.

Радиация

$$F_n = \beta \cdot k_{SB} (T^4 - T_0^4), \quad (4)$$

где k_{SB} – константа Стефана-Больцмана ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$);

β – коэффициент поглощения поверхности ($\beta = 0.7$);

T_0 – температура поглощающей среды.

Граничные условия на противоположной стороне задаются только для условий естественной конвекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования процесса нагрева конструкции представлены на рис. 1-3.

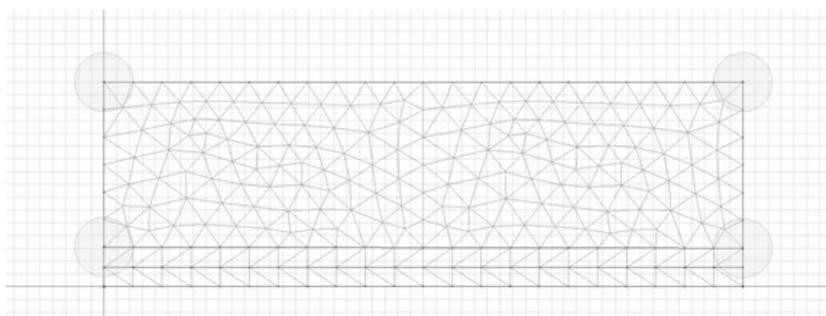


Рис. 1. Схема расположения слоев материала в конструкции

Fig. 1. Layout of material layers in the structure

На рис. 1 представлен вертикальный разрез монолитной плиты по оси рабочей арматуры. Верхний слой моделирует теплотехнические характеристики железобетонной конструкции, внутренний слой имеет характеристики стальной арматуры, а нижний – свойства защитного слоя бетона. Верхнее ребро на схеме задается уравнением конвекции (3) с теплотехническими параметрами для внутренних помещений с температурой воздуха 20°C . Нижнее ребро моделирует состояние пожара под плитой перекрытия по выражениям (3) и (4) с характеристиками, соответствующими условиям развивающегося пожара (1). Сетка конечных элементов имеет 245 узлов. Моделирование тепловых полей производится для бесконечной (неограниченной) пластины.

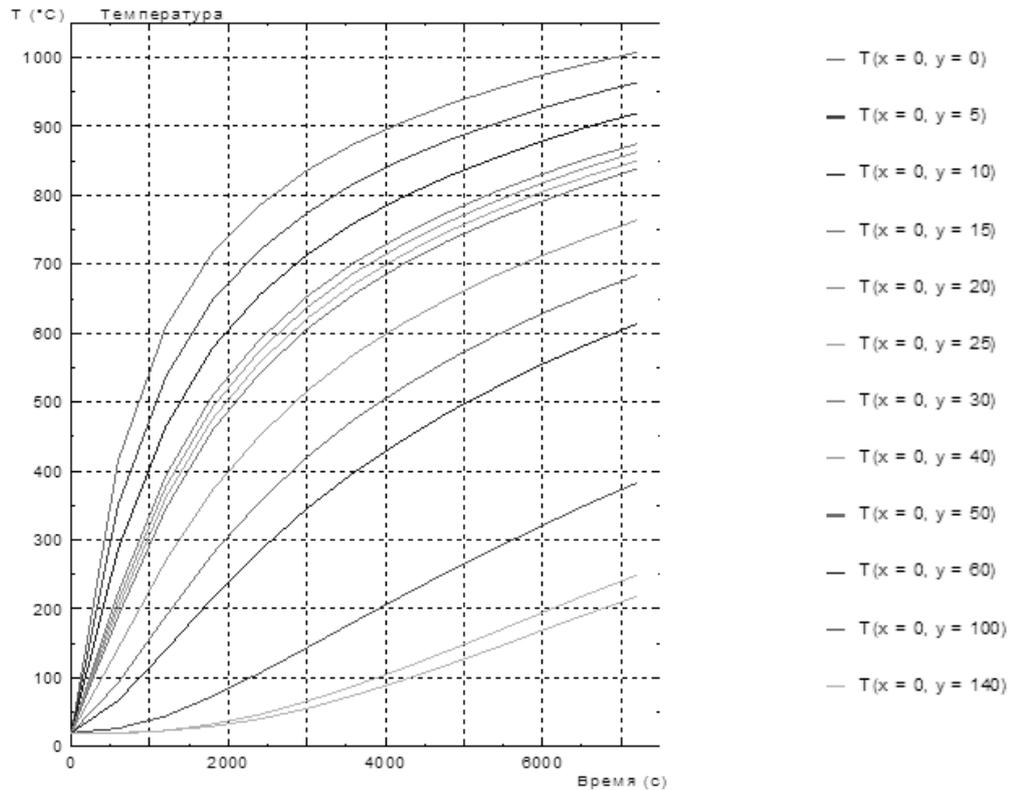
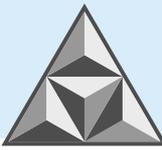


Рис. 2. Динамика изменения температуры во времени на различной глубине конструкции при ее нагреве без покрытия

Fig. 2. Dynamics of temperature change over time at different depth the structure when heating it uncovered

На рис. 1, 2 представлены графики изменения температуры от начального момента времени прогрева при пожаре конструкции на различной глубине. Они моделируют динамику разогрева слоев конструкции от нижнего ребра ($y = 0$ мм для конструкции без покрытия и $y = 20$ мм для конструкции с покрытием) с шагом 5 мм до глубины 40 мм и шагом 10 мм на глубине от 40 до 140 мм.

Анализ рис. 1, 2 указывает на адекватность модели, так как кривая, отвечающая процессу разогрева поверхности конструкции со стороны пожара, соответствует уравнению протекания пожара (1). Кривая, описывающая состояние поверхности с противоположной стороны конструкции, соответствует кондуктивному процессу разогрева с конвективным съемом теплоты – процесс с низкой кривизной графика (практически линейный инерциальный), обусловленный высокой теплоемкостью материала конструкции. Заметно выделяется группа кривых, для которых на различных временных этапах значения температур очень близки, и они практически не расходятся к конечному моменту времени моделирования пожара. Эти кривые отвечают процессу разогрева металлической арматуры и граничного слоя бетона (быстрый сквозной прогрев до очень близких температур по толщине). При достижении 560°C наблюдается потеря несущей способности конструкции.

Для рис. 2 характерным является экспоненциальный рост температуры в защитном слое бетона. Как следствие, строительная арматура интенсивно разогревается на ранних этапах пожара. В свою очередь, анализ рис. 3 показывает, что огнеупорное покрытие и защитный слой бетона, напротив, разогреваются медленно и более плавно; по глубине арматуры зависимости приобретают практически линейный характер.

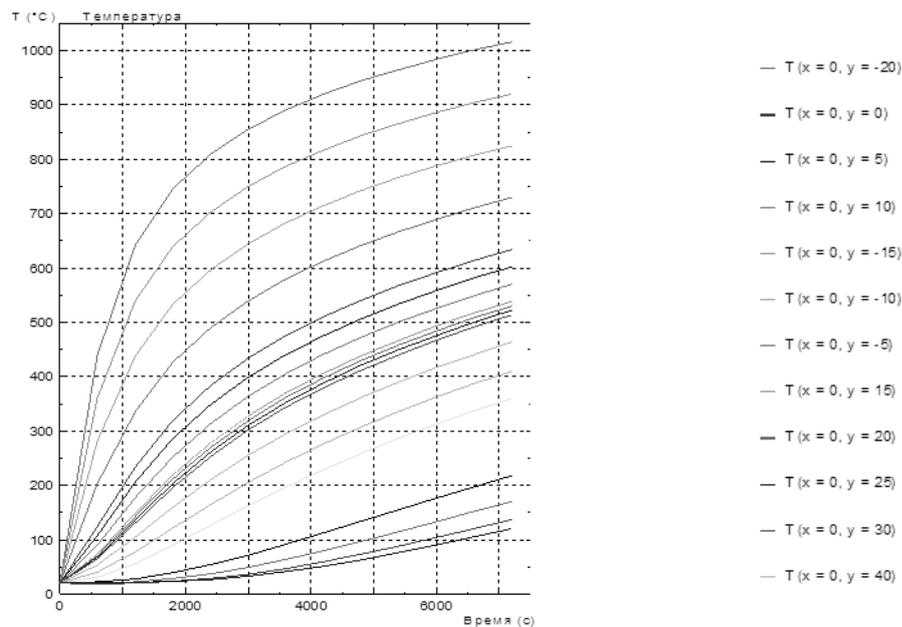
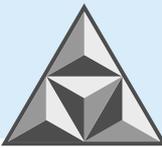


Рис. 3. Динамика изменения температуры во времени по глубине конструкции с огнеупорным покрытием при ее нагреве

Fig. 3. Dynamics of temperature change over time along the depth of the structure with refractory coating during its heating

Это обусловлено не только увеличенной толщиной слоя материала до арматуры со стороны пожара, но и физико-химическими процессами дегидратации материала, способствующими повышению теплоемкости покрытия и снижению ее теплопроводности.

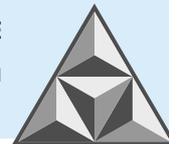
ВЫВОДЫ

1. Показано, что арматура в конструкции перекрытия прогревается до критической температуры уже через 2200 с (37 мин). Плита обеспечивает установленный предел огнестойкости по потере несущей способности R30.

2. Установлено, что использование огнеупорных покрытий из жаростойкого бетона позволяет в 4 раза увеличить предел огнестойкости типовых строительных конструкций. Время прогрева арматуры до критических температур в конструкции с покрытием из жаростойкого бетона (толщина 20 мм) замедляется до 7200 с (120 мин), что характерно для огнестойкости R120.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2023 году: информ.-аналитич. сб. П 46 Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2024. 110 с.
2. Крупные пожары на промышленных предприятиях в России в 2023-2024 годах // РИА Новости [сайт] URL: <https://ria.ru/20240124/pozhar-1923122923.html> (дата обращения 17.11.2024).
3. **Ройтман В.М.** Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М., Ассоциация «Пожнаука», 2001.
4. Свод правил СП 118.13330.2022. «СНиП 31-06-2009 Общественные здания и сооружения», Приказ МЧС России от 12 марта 2020 г. № 151 «Об утверждении свода правил СП 2.13130 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты».
5. **Некрасов К.Д.** Жаростойкий бетон на портландцементе. М.: Стройиздат, 1969. 192 с.



6. Свод правил СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности».
7. Пособие по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций из тяжелого бетона (к СТО 36554501-006-2006). НИИЖБ, Москва. 2008. 123 с.
8. **Овчинников А.А.** Разработка составов жаростойкого бетона на жидком стекле с суперпластификатором: автореф. дисс... канд. техн. наук / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный архитектурно-строительный университет». Иваново, 2003.
9. **Рудобашта С.П.** Математическое моделирование процессов электромагнитного нагрева строительных материалов // *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. Вып. 3. С. 46-56. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5039/view> (дата обращения 12.01.2025).
10. **Лазарев А.А., Федотов И.Ю., Андреев Р.Н.** Моделирование высокотемпературного воздействия пожара на остекление оконных проемов зданий перемещающимся источником теплоты // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4. Вып. 3. С. 8-17. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5047/view> (дата обращения 12.01.2025).

Поступила в редакцию 24.01.2025

Одобрена после рецензирования 20.02.2025

Принята к опубликованию 04.03.2025

REFERENCES

1. *Fires and fire safety in 2023: information and analytical proceedings* (2024), Balashikha: FGBU VNIPO MES of Russia, 110 p. (In Russian).
2. Major fires at industrial enterprises in Russia in 2023-2024: official site RIA Novosti - Moscow (2024), available at: <https://ria.ru/20240124/pozhar-1923122923.html> (accessed on 17.11.2024) (in Russian).
3. **Roitman, V.M.** (2001), *Inzhenernye resheniya po otsenke ognestoikosti proektiruemykh i rekonstruiруemykh zdaniy [Engineering solutions for fire resistance assessment of designed and reconstructed buildings]*, Association 'Pojnauka', Moscow, Russia (in Russian).
4. *Code of rules SP 118.13330.2022* (2022). 'SNiP 31-06-2009 Public buildings and structures', Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia from 12 March 2020 N 151 "On approval of the set of rules SP 2.13130" Fire protection systems. Ensuring fire resistance of defence objects', Moscow, Russia (in Russian).
5. **Nekrasov, K.D.** (1969), *Zharostoikiy beton na portlandtsemente [Heat-resistant concrete on Portland cement]*, Stroyizdat, Moscow, UdSSR (in Russian).
6. *Code of Regulations SP 468.1325800.2019* (2019). 'Concrete and reinforced concrete structures. Rules for ensuring fire resistance and fire protection', Moscow, Russia (in Russian).
7. *Manual on calculation of fire resistance and fire safety of reinforced concrete structures made of heavy concrete* (to STO 36554501-006-2006) (2008), NIIZhB, Moscow, Russia (in Russian).
8. **Ovchinnikov, A.A.** (2003), Development of heat-resistant concrete compositions on liquid glass with superplasticiser: Abstract of diss. cand. tech. sc., Ivanovo State University of Architecture and Civil Engineering, Ivanovo, Russia.
9. **Rudobashta, S.P.** (2021), "Mathematical modeling of electromagnetic heating processes of building materials", *Uмnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, vol. 2, no. 3, pp. 46-56, available at: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/5039/view> (accessed 12.01.2025) (in Russian).
10. **Lazarev, A.A., Fedotov, I.Yu. and Andreev, R.N.** (2023), "Modelling of the high-temperature effects of fire on glazing of building embrasures using a moving heat source" // *Uмnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, vol. 4, no. 3, pp. 8-17, available at: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/5047/view> (accessed 10.01.2025) (in Russian).

Received 24.01.2025

Approved 20.02.2025

Accepted 04.03.2025