

## Особенности применения метода конечных элементов при выполнении теплотехнических расчетов незащищенных стальных строительных конструкций в рамках разработки проектной документации по их огнезащите

Татьяна Юрьевна Еремина<sup>1</sup>, Денис Александрович Минайлов<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> 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.** Применение современных компьютерных технологий позволило достичь высоких практических и экономических результатов в строительстве современных зданий и сооружений. Это связано с тем, что современные программные комплексы позволяют с достаточной точностью прогнозировать поведение строительных конструкций в условиях воздействия различных факторов, в том числе и в условиях высокотемпературного воздействия. При этом следует отметить, что в подавляющем большинстве современных программных комплексов наибольшее распространение получили сеточные методы решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье, а именно метод конечных элементов. Результат расчета, полученный при помощи метода конечных элементов, зависит от различных факторов, которые могут быть не всегда очевидны при решении конкретной задачи, но для получения необходимой точности решения их необходимо учитывать в процессе моделирования.

**Цели и задачи.** Целью работы является оценка сходимости численного решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье методом конечных элементов при выполнении теплотехнического расчета прогрева незащищенных стальных строительных конструкций в рамках разработки проектной документации по их огнезащите, а также валидация полученных результатов математического моделирования с известными результатами расчетно-аналитических решений.

**Методы.** В качестве объекта моделирования принята стальная колонна двутаврового сечения профиля № 20 по ГОСТ 8239. Моделирование прогрева исследуемой конструкции методом конечных элементов производилось без использования огнезащиты при упрощении размерности задачи с трехмерной до двухмерной. Верификация полученных результатов моделирования производилась по критерию сходимости численного решения задачи на моделируемом интервале времени (60 мин) при последовательности сеток (трех сеток с числом степеней свободы (DOFs): 200, 2084, 7102) и шагов по времени (десяти шагов по времени: 0,05, 0,1, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30 с). Валидация полученных результатов производилась сопоставлением с результатами теплотехнических расчетов металлоконструкций, изложенными в книге А.И. Яковлева «Расчет огнестойкости строительных конструкций».

**Результаты и обсуждение.** В результате проведения серии теплотехнических расчетов прогрева исследуемой стальной строительной конструкции с различными шагами сеток и шагами по времени установлено, что шаг моделирования по времени оказал большее влияние на сходимость полученных результатов, чем шаг сетки. При этом изменение сходимости полученных результатов в исследуемом интервале времени для всех вариантов моделирования происходило неравномерно, а именно: в начале моделируемого интервала времени разница получаемых температур в сечении конструкции сначала увеличивалась, а затем уменьшалась. Сравнение полученных результатов с результатами теплотехнических расчетов, изложенными в книге А.И. Яковлева, показало, что полученная средняя температура в сечении конструкции оказалась ниже температуры, указанной в книге А.И. Яковлева, при этом разница между полученными временами достижения критической температуры (450–750 °С) увеличивается как при увеличении значения критической температуры, так и при увеличении приведенной толщины металла.

**Заключение.** Оценка сходимости полученных результатов моделирования прогрева стальной строительной конструкции методом конечных элементов и их валидация с известными расчетно-аналитическими решениями показали, что применение метода конечных элементов при выполнении теплотехнических расчетов в рамках разработки проектной документации по огнезащите стальных строительных конструкций имеет свои особенности, которые необходимо учитывать для получения требуемой точности решения.

**Ключевые слова:** огнестойкость; стальная строительная конструкция; численное моделирование; сходимость численного решения; верификация численных решений; проект огнезащиты

Для цитирования: Еремина Т.Ю., Минайлов Д.А. Особенности применения метода конечных элементов при выполнении теплотехнических расчетов незащищенных стальных строительных конструкций в рамках разработки проектной документации по их огнезащите // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 1. С. 40–58. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.40-58

✉ Минайлов Денис Александрович, e-mail: minailov-denis@mail.ru

# Application of the finite element method for thermal calculations of unprotected steel building structures within the framework of development of design documentation for their fire protection

Tayana Yu. Eremina<sup>1</sup>, Denis A. Minailov<sup>2</sup> ✉

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> 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.** The application of modern computer technologies made it possible to achieve high practical and economic results in the construction of modern buildings and structures. This is due to the fact that modern software complexes allow to predict with sufficient accuracy the behaviour of building structures under the influence of various factors, including high-temperature influence. It should be noted that in the overwhelming majority of modern software systems, the most widespread are grid methods for solving the Fourier differential equation of heat conduction, namely the finite element method. The calculation result obtained using the finite element method depends on various factors that may not always be obvious when solving a particular problem, but in order to obtain the necessary accuracy of the solution, they must be taken into account in the modelling process.

**Aims and Objectives.** The aim of the work is to assess the convergence of the numerical solution of the Fourier differential heat conduction equation by the finite element method when performing the thermal calculation of heating of unprotected steel building structures within the framework of the development of design documentation for their fire protection, as well as validation of the obtained results of mathematical modelling with the known results of calculation and analytical solutions.

**Methods.** A steel column of I-beam section of profile No. 20 according to GOST 8239 was taken as a modelling object. Modelling of heating of the investigated structure by the finite element method was carried out without the use of fire protection when simplifying the dimensionality of the problem from three-dimensional to two-dimensional. Verification of the obtained modelling results was performed by the criterion of convergence of the numerical solution of the problem at the modelled time interval (60 min) at the sequence of meshes (three meshes with the number of degrees of freedom (DOFs): 200, 2,084, 7,102) and time steps (ten time steps: 0.05, 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30 s). Validation of the obtained results was performed by comparison with the results of thermal calculations of steel structures, set out in the book "Calculation of fire resistance of building structures" by A.I. Yakovlev.

**Results and Discussion.** As a result of carrying out a series of thermal calculations of heating of the studied steel building structure with different grid steps and time steps, it was found that the modelling time step had a greater influence on the convergence of the obtained results than the grid step. At the same time, the change in the convergence of the obtained results in the studied time interval for all modelling variants occurred unevenly, namely: at the beginning of the modelled time interval, the difference of the obtained temperatures in the cross-section of the structure first increased and then decreased. Comparison of the obtained results with the results of thermotechnical calculations stated in the book by A.I. Yakovlev showed that the obtained average temperature in the cross-section of the structure was lower than the temperature stated in the book by A.I. Yakovlev, while the difference between the obtained times of reaching the critical temperature (450–750 °C) increases both with increasing the value of the critical temperature and with increasing the reduced thickness of the metal.

**Conclusion.** The assessment of convergence of the obtained results of modelling the heating of steel building structure by the finite element method and their validation with the known design and analytical solutions have shown that the application of the finite element method in the performance of thermal calculations within the development of design documentation for fire protection of steel building structures has its own features, which must be taken into account to obtain the required accuracy of the solution.

**Keywords:** fire resistance; steel building structure; numerical modelling; convergence of numerical solution; verification of numerical solutions; fire protection project

**For citation:** Eremina T.Yu., Minailov D.A. Application of the finite element method for thermal calculations of unprotected steel building structures within the framework of development of design documentation for their fire protection. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(1):40-58. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.01.40-58 (rus).

✉ Denis Alexandrovich Minailov, e-mail: minailov-denis@mail.ru

**Введение**

В настоящее время развитие строительной отрасли неразрывно связано с применением математического моделирования, так как такой подход позволяет не только повысить качество проектной документации, но и сократить сроки ее подготовки [1, 2]. При этом следует отметить, что существующая в России нормативно-правовая база по проектированию стальных строительных конструкций имеет ряд недостатков, связанных с ее несовершенством, а применяемое программное обеспечение требует актуализации [3, 4].

Сегодня одним из перспективных направлений для достижения цели инновационного развития функциональных блоков строительной отрасли является внедрение математического моделирования, включая оптимизацию процессов проектирования, строительства, эксплуатации и утилизации объекта строительства.

Сегодня для решения различных задач в строительстве существует более 100 программных комплексов (рис. 1) [1], которые зачастую на этапах проектирования применяются совместно и дополняют друг друга.

Зачастую применение любого программного комплекса требует в соответствии с решаемой задачей определенной настройки его модулей, позволяющей с достаточной точностью описать рассматриваемый процесс. Для этого нужно не только понимать протекание моделируемого процесса, но и как происходит сам процесс моделирования (рис. 2).

Одним из важных вопросов, рассматриваемых при проектировании стального каркаса зданий и сооружений, является вопрос обеспечения его огнестойкости, решаемый в рамках разработки проектной документации по огнезащите стальных строительных конструкций различными средствами огнезащиты [3–18]. Сам процесс разработки проектной документации по огнезащите стальных строительных конструкций можно условно разделить на следующие этапы (рис. 3), результатом которых становится выбор средства огнезащиты и его толщины.

При определении пределов огнестойкости стальных строительных конструкций в рамках разработки проектной документации по их огнезащите, как правило, применяется расчетно-аналитический метод [3, 4, 19], совместно с которым, или вместо него, также могут использоваться методы матема-



Рис. 1. Современные программные комплексы  
Fig. 1. Modern software systems

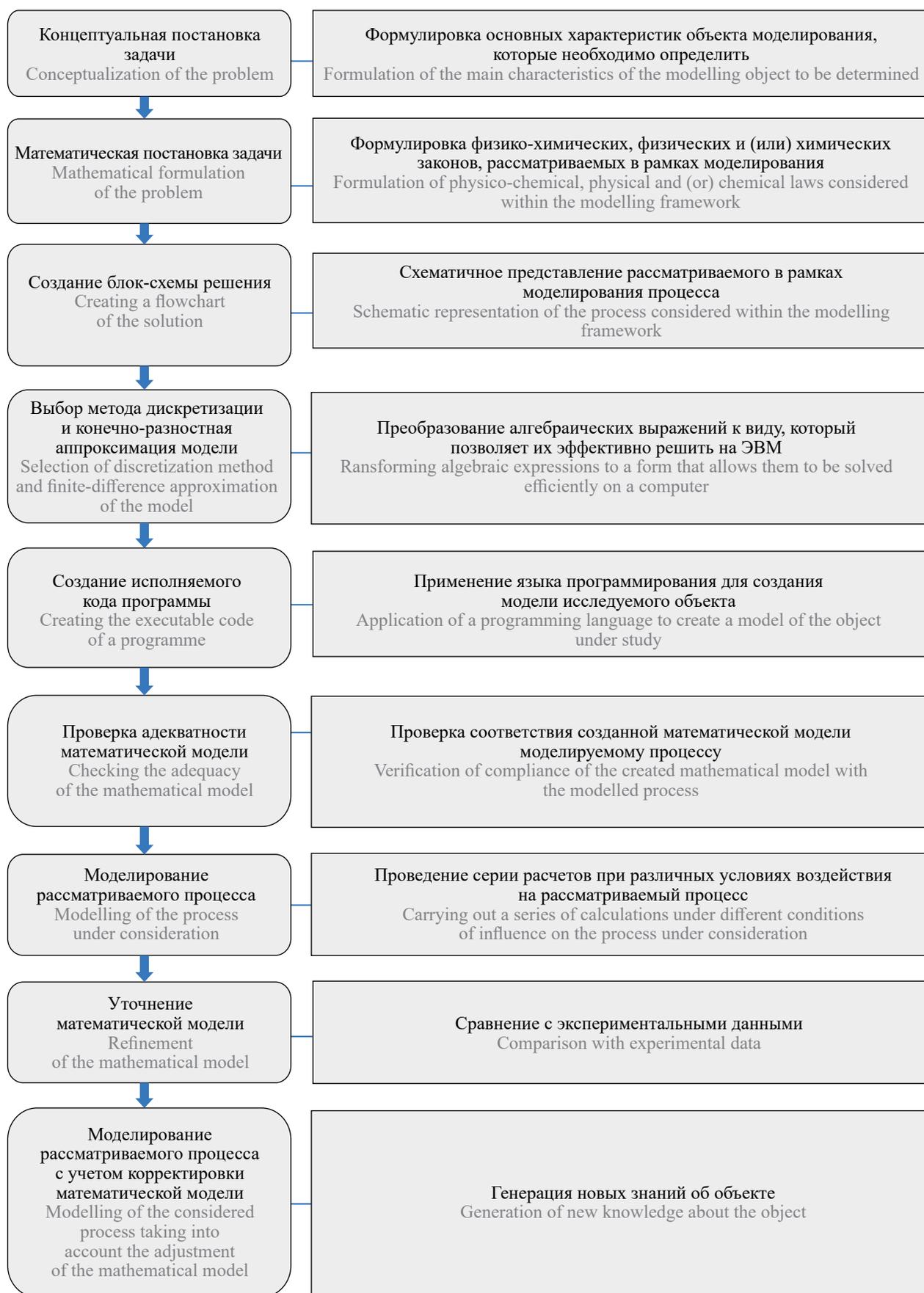


Рис. 2. Последовательность проведения компьютерного моделирования [2]  
Fig. 2. Sequence of computer modeling [2]



**Рис. 3.** Алгоритм проектирования огнезащиты строительных конструкций  
 Fig. 3. Algorithm for designing fire protection of building structures

тического моделирования<sup>1, 2, 3</sup> [17, 18, 20–43]. Среди применяемых методов математического моделирования наиболее широкое распространение получили сеточные методы, среди которых можно выделить метод конечных элементов, реализованный в большинстве современных программных комплексах.

В случае применения метода конечных элементов при решении теплотехнической задачи прогрева стальной строительной конструкции необходимо про-

вести верификацию полученных результатов моделирования, а также их интерпретацию [23, 25, 31]. При этом следует отметить, что для выполнения численных расчетов должно применяться верифицированное и валидированное программное обеспечение, а также привлекаться квалифицированные специалисты, обладающие специальными знаниями в области огнестойкости стальных строительных конструкций и в области вычислительной математики.

### Цель

Оценить сходимость численного решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье методом конечных элементов при выполнении теплотехнического расчета прогрева незащищенных стальных строительных конструкций в рамках разработки проектной документации по их огнезащите, а также валидацию полученных результатов математического моделирования с известными результатами расчетно-аналитических решений.

<sup>1</sup> Johnston R.P.D., Lim J.B.P., Sonebi M., Wrzesien A.M., Armstrong C. The Structural Behaviour in Fire of a Cold-Formed Steel Portal Frame Having Semi-Rigid Joints. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-structural-behaviour-in-fire-of-a-cold-formed-Johnston-Lim/39855c2970a9929f79cf35afd48e0e5959808510> (accessed: 15 October 2021).

<sup>2</sup> Circolare DCPREV 9962 del 24/07/2020 — Implementazione di Soluzioni Alternative di Resistenza al Fuoco; Chiarimenti e Indirizzi Applicativi; Ministero dell'interno — Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e Della Difesa Civile. Direzione Centrale per la Prevenzione e la Sicurezza Tecnica. Area Protezione Passiva : Rome, Italy, 2020.

<sup>3</sup> An Overview of Intumescent Coatings. American Coating Association. URL: <https://www.paint.org/coatingstech-magazine/articles/overview-intumescent-coatings/> (accessed: 18 April 2022).

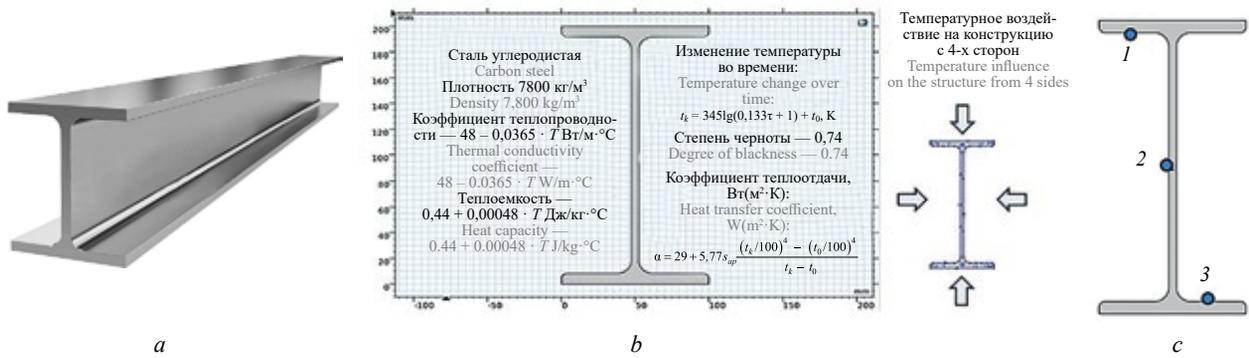


Рис. 4. Стальная колонна двутаврового сечения профиля № 20 по ГОСТ 8239–89<sup>4</sup>: *a* — внешний вид; *b* — 2D-модель; *c* — места контроля температур  
 Fig. 4. Steel column of I-beam section of profile No. 20 according to GOST 8239–89<sup>4</sup>: *a* — external view; *b* — 2D-model; *c* — temperature control points

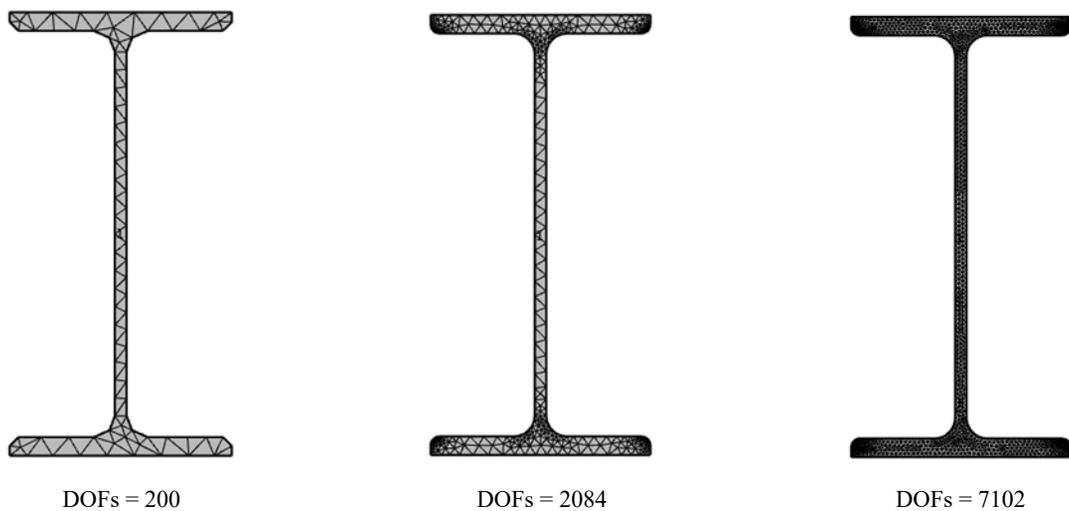


Рис. 5. Применяемые при расчетах сетки с числом степеней свободы DOFs  
 Fig. 5. Meshes used in calculations with the number of degrees of freedom DOFs

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- провести серию численных расчетов методом конечных элементов прогрева стальной колонны двутаврового сечения профиля № 20 по ГОСТ 8239<sup>4</sup> в условиях воздействия стандартного температурного режима при различном шаге сетки и шаге по времени;
- оценить сходимость полученных результатов моделирования;
- провести валидацию полученных результатов моделирования с известными расчетно-аналитическими решениями.

### Методы

В качестве объекта моделирования принята стальная колонна двутаврового сечения профиля № 20 по ГОСТ 8239–89<sup>4</sup> (рис. 4). Моделирование

<sup>4</sup> ГОСТ 8239–89. Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент.

прогрева исследуемой конструкции методом конечных элементов производилось без использования огнезащиты при упрощении размерности задачи с трехмерной до двухмерной, так как для стержневых конструкций можно принять изменение температуры только по поперечному сечению в двух направлениях.

Верификация полученных результатов моделирования производилась по критерию сходимости численного решения задачи на моделируемом интервале времени (60 мин) при последовательности сеток (трех сеток с числом степеней свободы (DOFs): 200, 2084, 7102) (рис. 5) и шагов по времени (десяти шагов по времени: 0,05, 0,1, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30 с).

Начальные и граничные условия моделирования приведены в табл. 1.

Валидация полученных результатов моделирования при различных условиях обогрева стальной строительной конструкции (табл. 2) производилась сопоставлением полученных температур в местах

**Таблица 1.** Начальные и граничные условия моделирования  
**Table 1.** Initial and boundary conditions for modelling

Начальные условия моделирования Initial modelling conditions
<p>Температура по сечению конструкции одинакова и равна температуре окружающей среды:  <math>T_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}</math> (293,15 K)                      The temperature across the cross-section of the structure is the same and equal to the ambient temperature:  <math>T_{out} = 20 \text{ }^\circ\text{C}</math> (293.15 K)</p>
Граничные условия моделирования Modelling boundary conditions
<p>Изменение температуры среды <math>t_b</math>, K, во времени <math>\tau</math>, с, задается следующим уравнением:                      The change of the medium temperature <math>t_{in}</math>, K, in time <math>\tau</math>, s, is given by the following equation:</p> $T_b = T_n + 345 \cdot \lg\left(\frac{8}{60}\tau + 1\right).$ $T_{in} = T_{out} + 345 \cdot \lg\left(\frac{8}{60}\tau + 1\right).$ <p>Коэффициент теплоотдачи <math>\alpha</math>, Вт/м<sup>2</sup>·К, от среды к поверхности конструкции в связи с отсутствием экспериментальных данных вычисляется по формуле:                      The heat transfer coefficient <math>\alpha</math>, W/m<sup>2</sup>·K, from the medium to the surface of the structure due to the lack of experimental data is calculated by the formula:</p> $\alpha = 29 + 5,77 \cdot s_{np} \frac{(t_b/100)^4 - (t_0/100)^4}{t_b - t_0}$ $\alpha = 29 + 5,77 \cdot s_{sp} \frac{(t_{in}/100)^4 - (t_0/100)^4}{t_{in} - t_0},$ <p>где <math>s_{np}</math> — приведенная степень черноты; <math>t_0</math> — температура стальной строительной конструкции, K.                      where <math>s_{sp}</math> is the reduced degree of blackness; <math>t_0</math> is the temperature of steel building structure, K.</p> $s_{np} = \frac{1}{\left(\frac{1}{s}\right) + \left(\frac{1}{s_0}\right) - 1}$ $s_{sp} = \frac{1}{\left(\frac{1}{s}\right) + \left(\frac{1}{s_0}\right) - 1},$ <p>где <math>s = 0,85</math>; <math>s_0</math> — степень черноты поверхности стальной строительной конструкции                      where <math>s = 0.85</math>; <math>s_0</math> — degree of blackness of the surface of steel building structure</p>

контроля (рис. 4), а также максимальной, минимальной и средней температур в сечении конструкции с результатами теплотехнических расчетов металлоконструкций, изложенными в книге [19].

### Результаты и их обсуждение

Результаты численного моделирования прогрева на моделируемом интервале времени (60 мин) при последовательности сеток (трех сеток с числом степеней свободы (DOFs): 200, 2084, 7102) и шагов по времени (десяти шагов по времени: 0,05, 0,1, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30 с) представлены на рис. 6.

В качестве параметра контроля сходимости решения задачи прогрева стального двутавра было выбрано значение разницы между средней темпера-

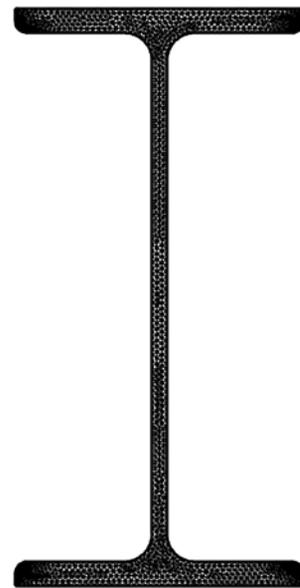
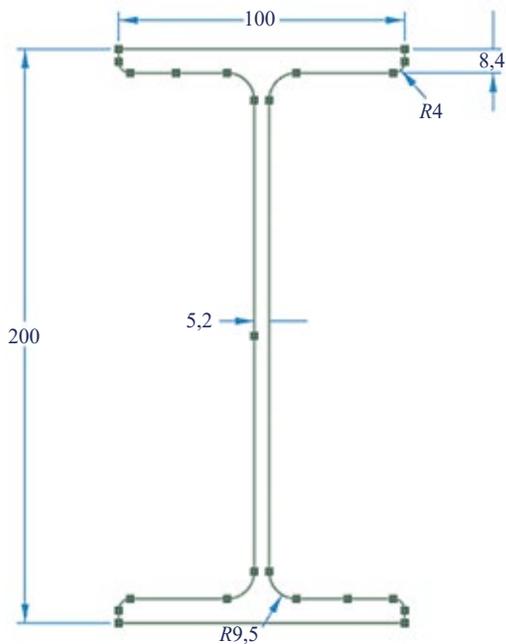
турой сечения, полученной при минимальном принятом шаге сетки и временном шаге решателя, и температурами, полученными при последующих вариантах шагов сеток и временных шагов решателя. За критерий сходимости принято значение получаемой разности не более 0,1 К.

Сравнительный анализ полученных результатов моделирования показал, что выбранному критерию сходимости удовлетворяет шаг времени решателя не более 1 с и сетка с числом степеней свободы не менее DOFs = 2084 (рис. 7, 8).

Результаты сравнения полученных температур в сечении рассматриваемой конструкции при различных вариантах обогрева с результатами, полученными расчетно-аналитическими методами [19], представлены на рис. 9–16.

**Таблица 2.** Варианты обогрева стальной строительной конструкции  
**Table 2.** Heating options for a steel building structure

Стальная колонна двутаврового сечения профиля № 20 по ГОСТ 8239–89<sup>4</sup>  
 Steel column of I-beam section of profile No. 20 according to GOST 8239–89<sup>4</sup>



Геометрические размеры сечения конструкции  
 Geometric dimensions of the cross-section of the structure

Число степеней свободы DOFs = 7102  
 Number of degrees of freedom DOFs = 7,102

Вариант численного моделирования / Numerical modelling option

№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Временной шаг моделирования, с / Modelling time step, s

1	1	1	1	1	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

Количество сторон обогрева / Number of heating sides

1	1	2	2	2	3	3	4

Обогреваемый периметр, мм / Heated perimeter, mm

100,00	283,21	383,21	200,00	566,42	666,42	483,21	766,42
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Приведенная толщина металла, мм / Presented thickness of metal, mm

26,96	9,52	7,04	13,48	4,76	4,05	5,58	3,52
-------	------	------	-------	------	------	------	------

Из графиков на рис. 9–16 видно, что наиболее близкой к значениям температуры, полученной расчетно-аналитическим методом, оказалась средняя температура по сечению конструкции. При этом с увеличением приведенной толщины металла

наблюдается увеличение разницы между сравниваемыми температурами, а также наблюдается увеличение разницы во времени достижения критической температуры конструкции (450–750 °С) (рис. 17).

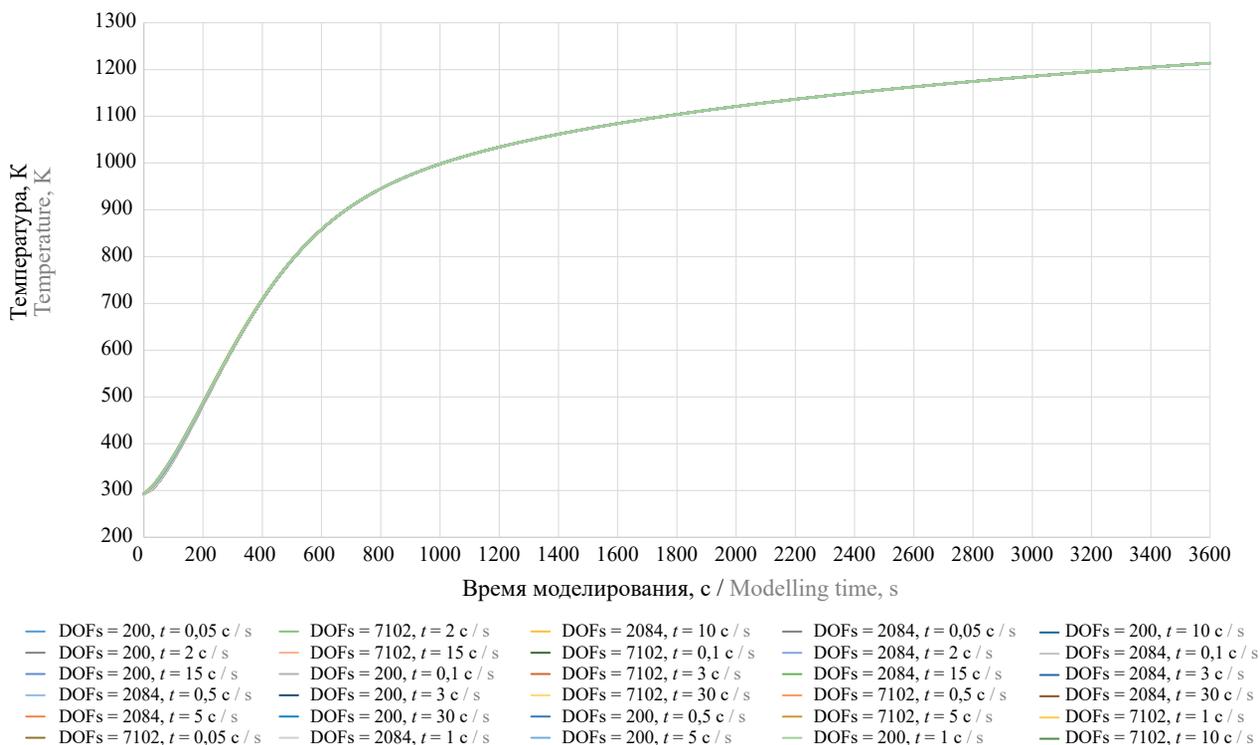


Рис. 6. Средняя температура в сечении двутавра в зависимости от количества степеней свободы (DOFs) и шага решателя по времени

Fig. 6. Average temperature in the I-beam cross section as a function of the number of degrees of freedom (DOFs) and the solver's time step

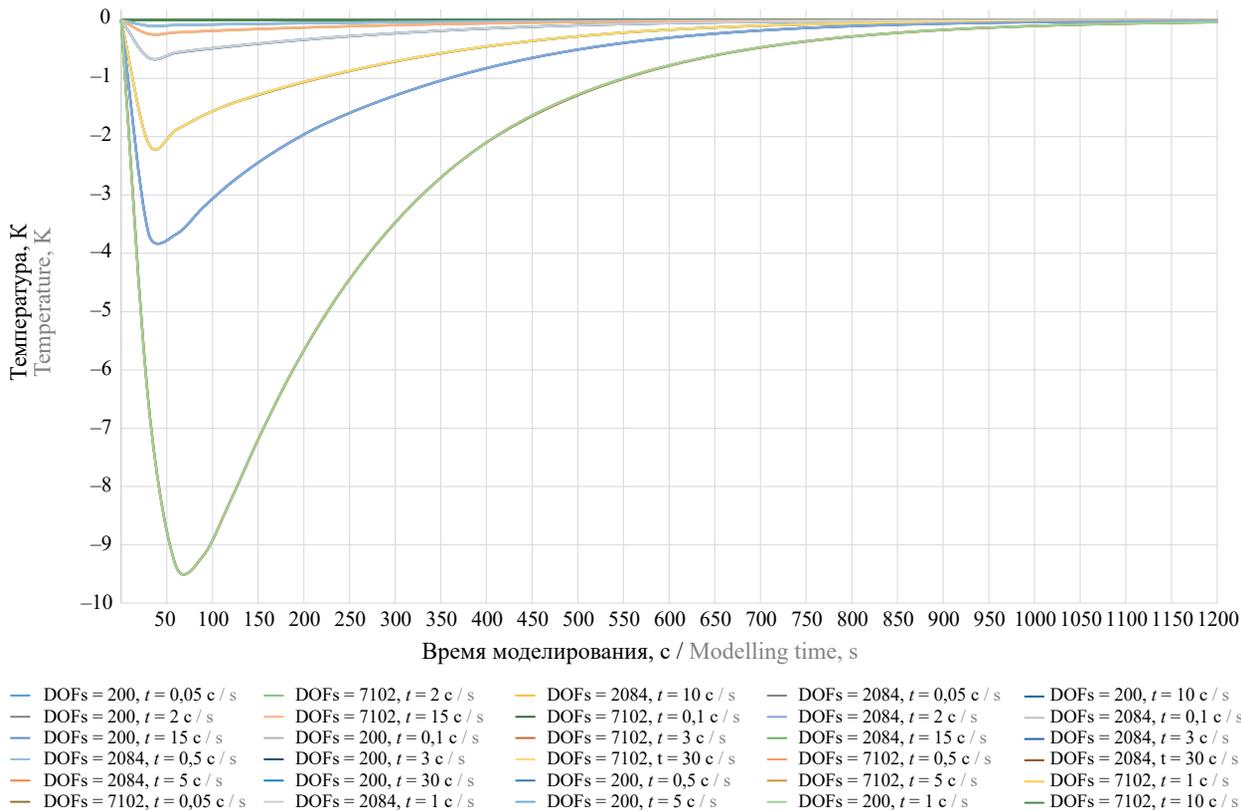


Рис. 7. Разница средних температур в сечении двутавра, полученных при различных шагах сетки и временном шаге решателя

Fig. 7. Difference of average temperatures in the cross-section of the I-beam obtained with different grid steps and time step of the solver

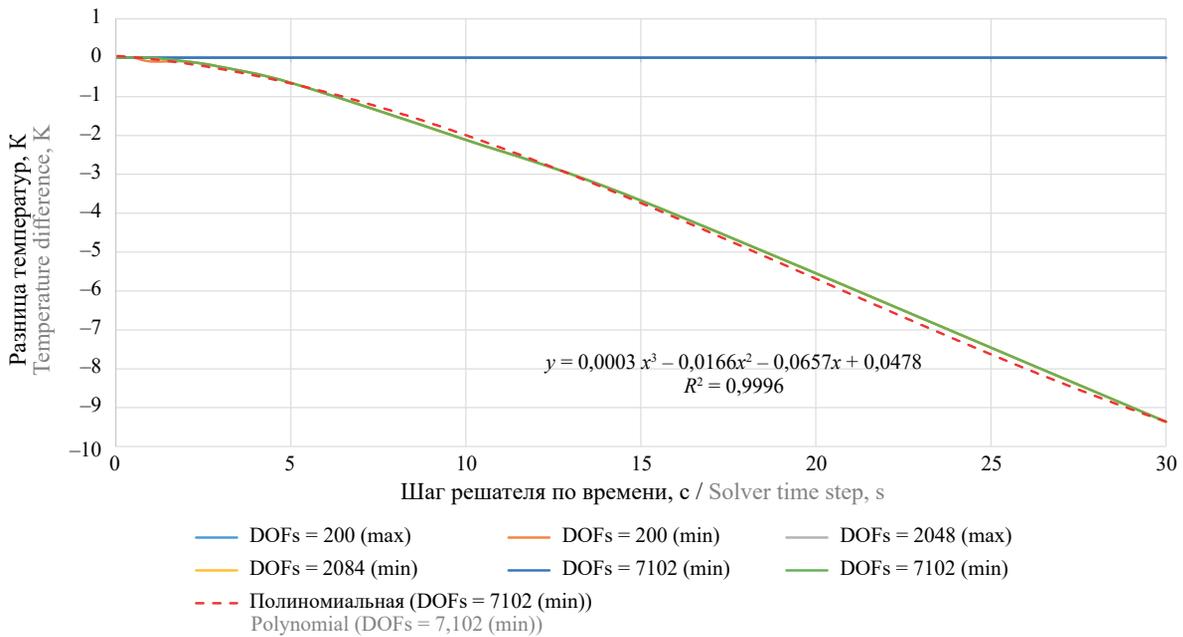


Рис. 8. Полученные максимальные и минимальные значения разностей температур  
Fig. 8. Obtained maximum and minimum values of temperature differences

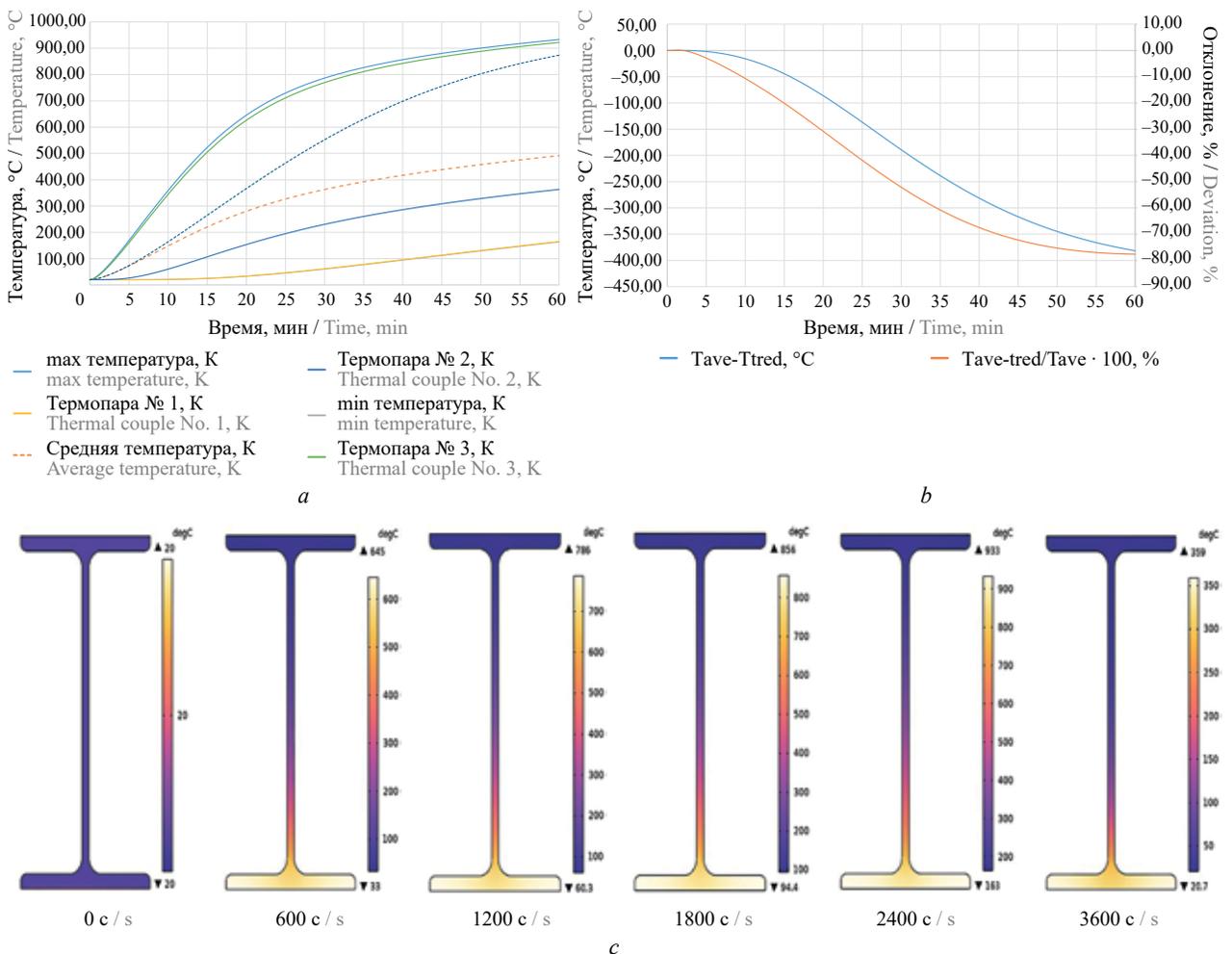


Рис. 9. Графики прогрева конструкции по 1-му варианту численного моделирования: а — графики прогрева конструкции; б — разница температур; с — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 26,96$  мм)  
Fig. 9. Graphs of structure heating according to the 1st variant of numerical modelling: a — graphs of structure heating; b — temperature difference; c — temperature in the structure section ( $t_{red} = 26,96$  mm)

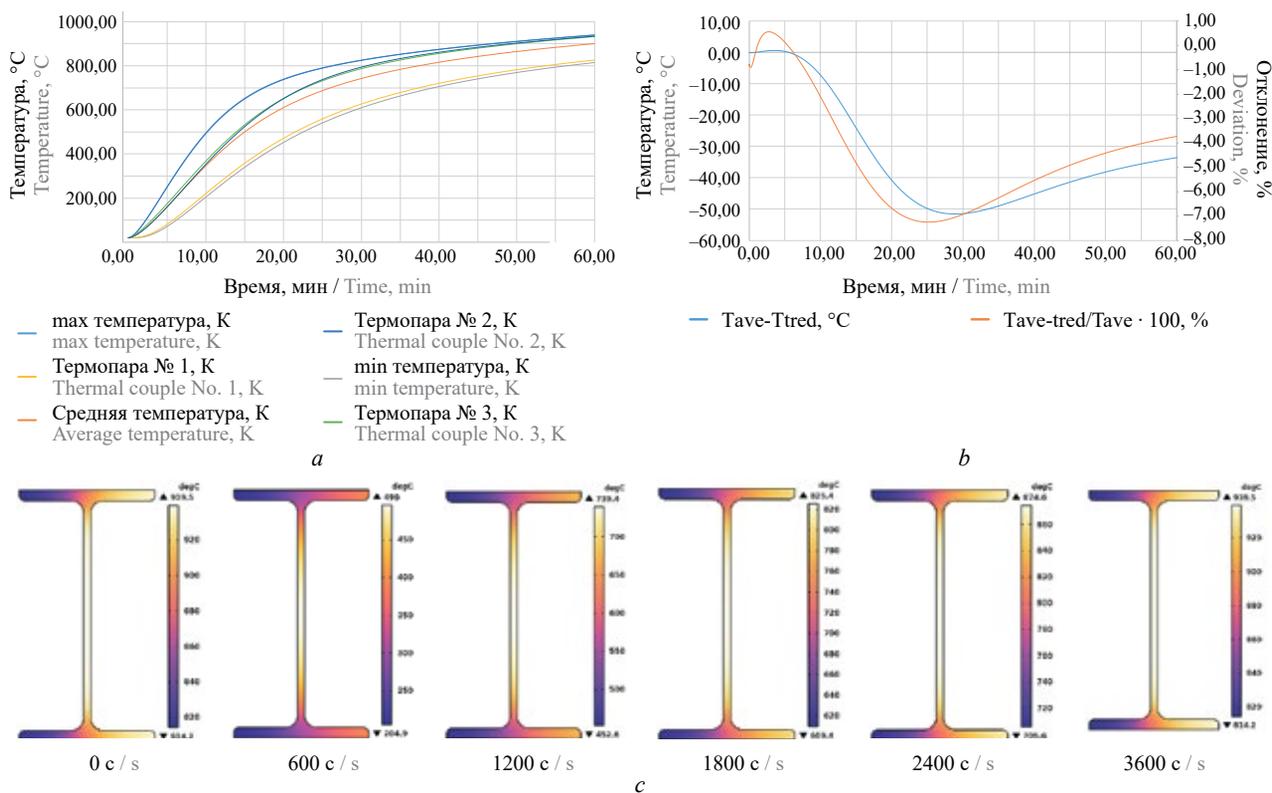


Рис. 10. Графики прогрева конструкции по 2-му варианту численного моделирования: а — графики прогрева конструкции; б — разница температур; с — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 9,52$  мм)

Fig. 10. Graphs of structure heating according to the 2nd variant of numerical modelling: a — graphs of structure heating; b — temperature difference; c — temperature in the cross-section of the structure ( $t_{red} = 9.52$  mm)

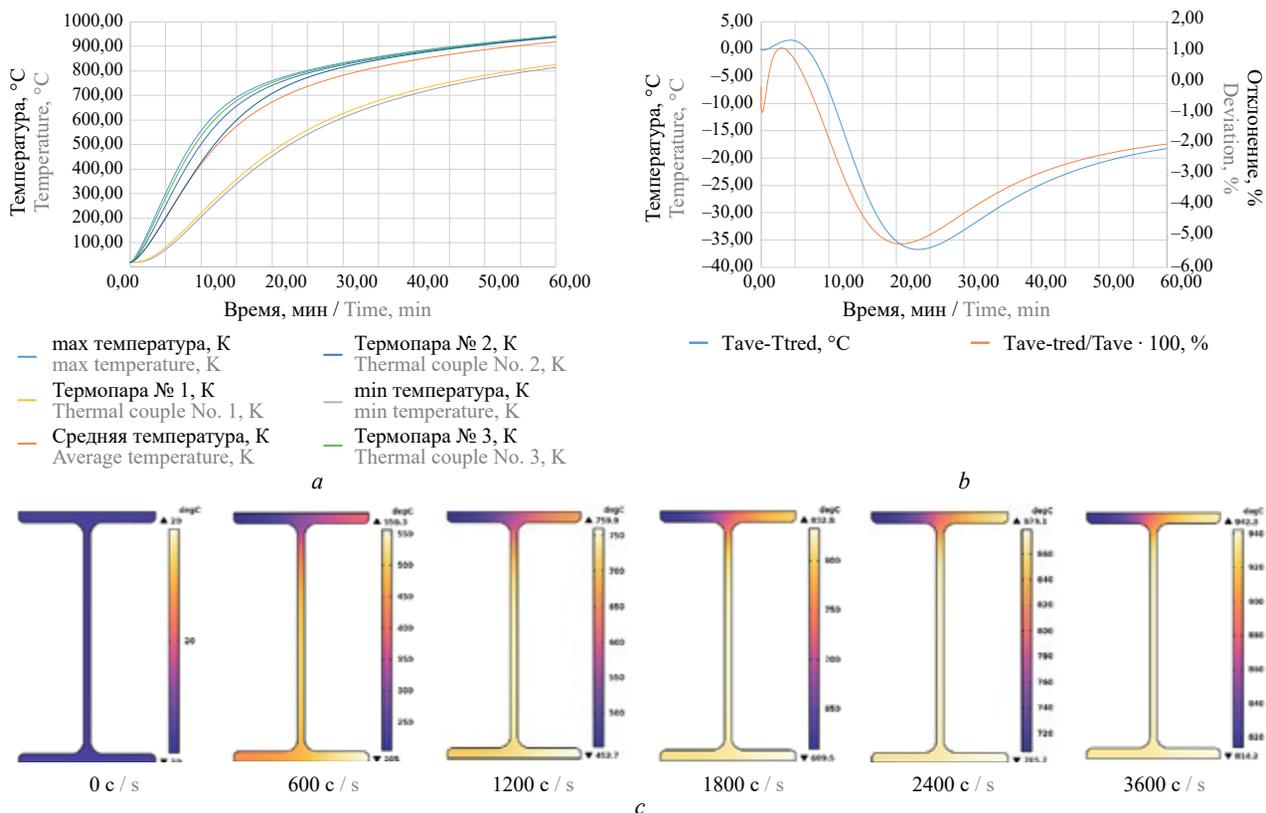
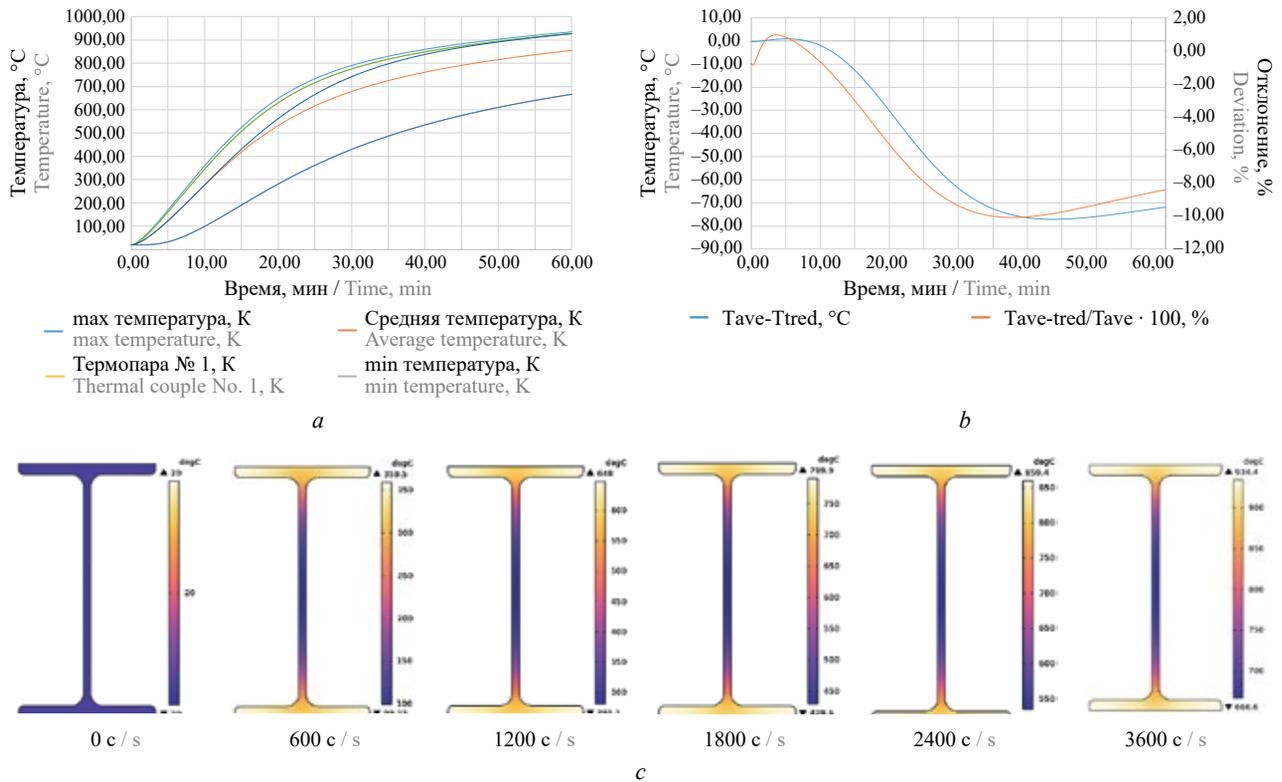
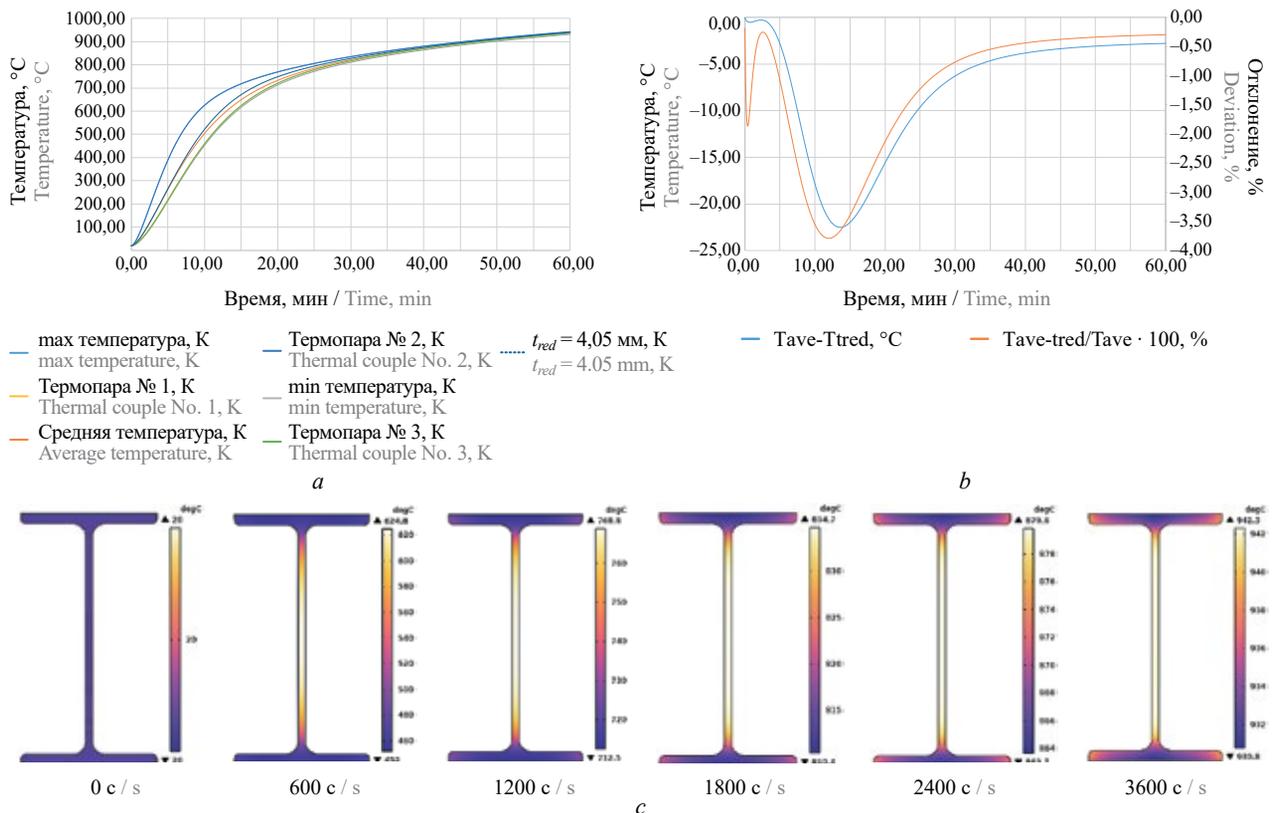


Рис. 11. Графики прогрева конструкции по 3-му варианту численного моделирования: а — графики прогрева конструкции; б — разница температур; с — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 7,04$  мм)

Fig. 11. Graphs of structure heating according to the 3rd variant of numerical modelling: a — graphs of structure heating; b — temperature difference; c — temperature in the cross-section of the structure ( $t_{red} = 7.04$  mm)



**Рис. 12.** Графики прогрева конструкции по 4-му варианту численного моделирования: *a* — графики прогрева конструкции; *b* — разница температур; *c* — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 13,48$  мм)  
**Fig. 12.** Graphs of structure heating according to the 4th variant of numerical modelling: *a* — graphs of structure heating; *b* — temperature difference; *c* — temperature in the cross-section of the structure ( $t_{red} = 13.48$  mm)



**Рис. 13.** Графики прогрева конструкции по 5-му варианту численного моделирования: *a* — графики прогрева конструкции; *b* — разница температур; *c* — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 4,76$  мм)  
**Fig. 13.** Graphs of structure heating according to the 5th variant of numerical modelling: *a* — graphs of structure heating; *b* — temperature difference; *c* — temperature in the cross-section of the structure ( $t_{red} = 4.76$  mm)

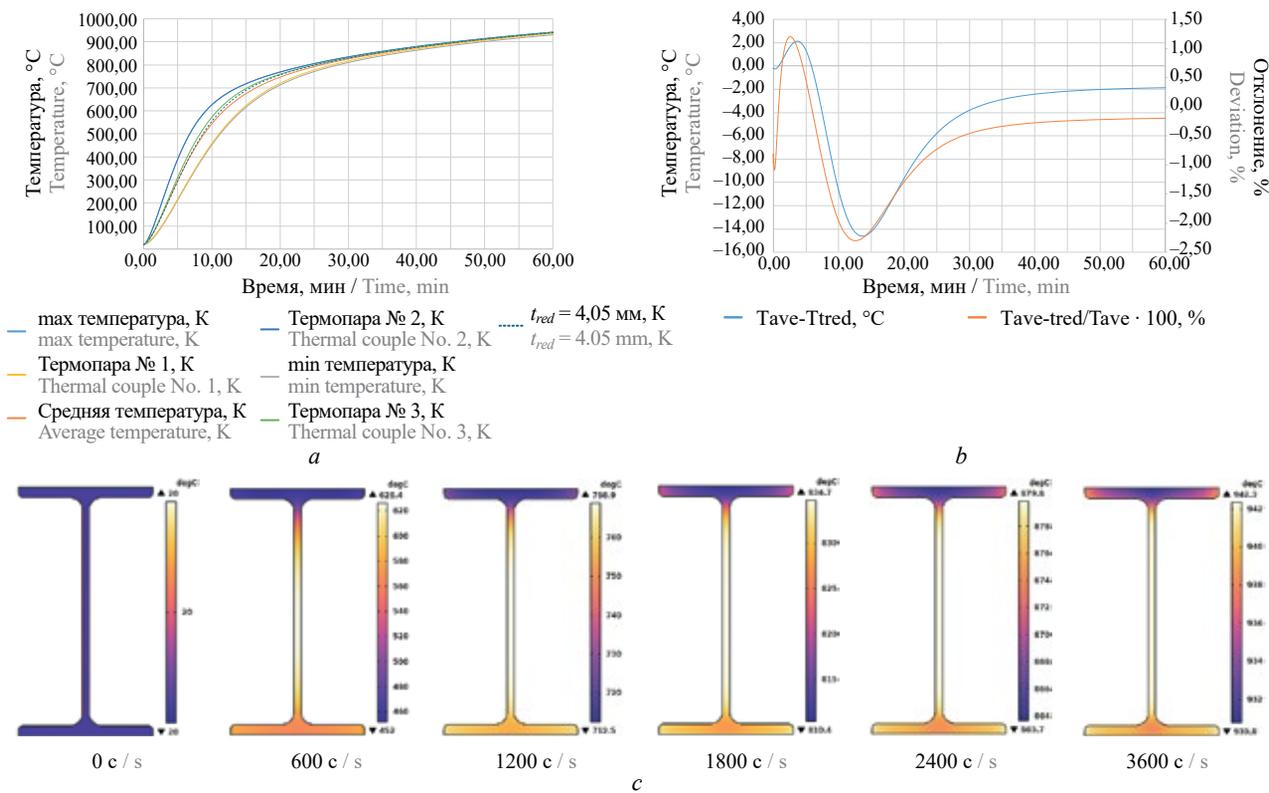


Рис. 14. Графики прогрева конструкции по 6-му варианту численного моделирования: *a* — графики прогрева конструкции; *b* — разница температур; *c* — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 4,05$  мм)  
 Fig. 14. Graphs of structure heating according to the 6th variant of numerical modelling: *a* — graphs of structure heating; *b* — temperature difference; *c* — temperature in the cross-section of the structure ( $t_{red} = 4.05$  mm)

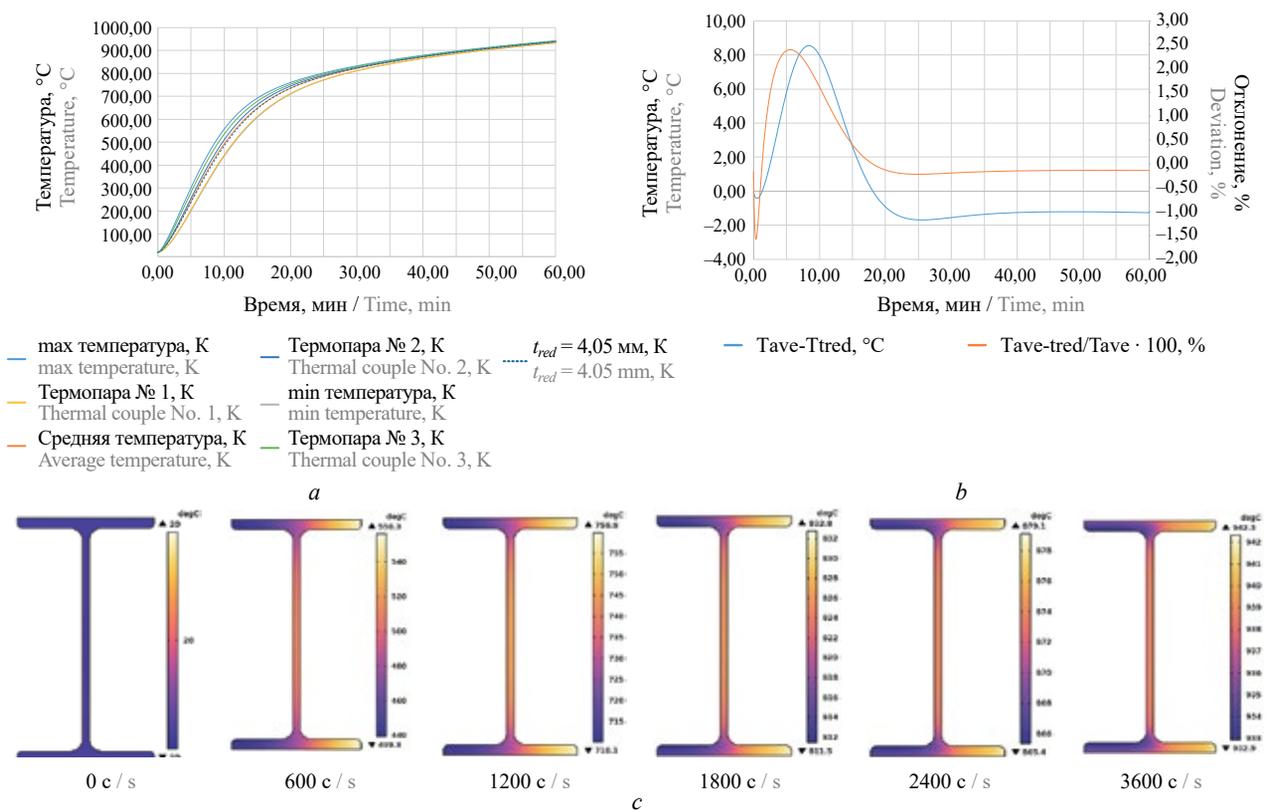


Рис. 15. Графики прогрева конструкции по 7-му варианту численного моделирования: *a* — графики прогрева конструкции; *b* — разница температур; *c* — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 5,58$  мм)  
 Fig. 15. Graphs of structure heating according to the 7th variant of numerical modelling: *a* — graphs of structure heating; *b* — temperature difference; *c* — temperature in the cross-section of the structure ( $t_{red} = 5.58$  mm)

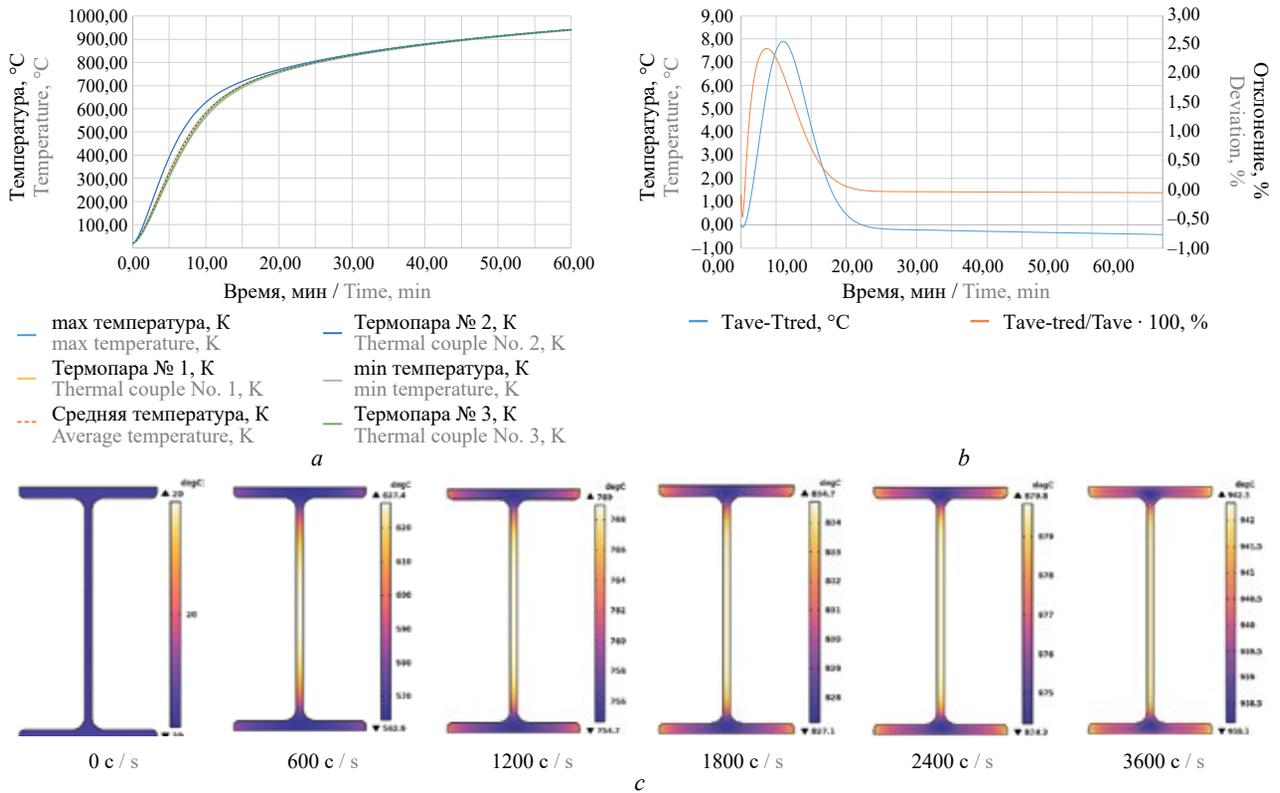


Рис. 16. Графики прогрева конструкции по 8-му варианту численного моделирования: а — графики прогрева конструкции; б — разница температур; с — температура в сечении конструкции ( $t_{red} = 3,52$  мм)  
 Fig. 16. Graphs of structure heating according to the 8th variant of numerical modelling: a — graphs of structure heating; b — temperature difference; c — temperature in the cross-section of the structure ( $t_{red} = 3.52$  mm)

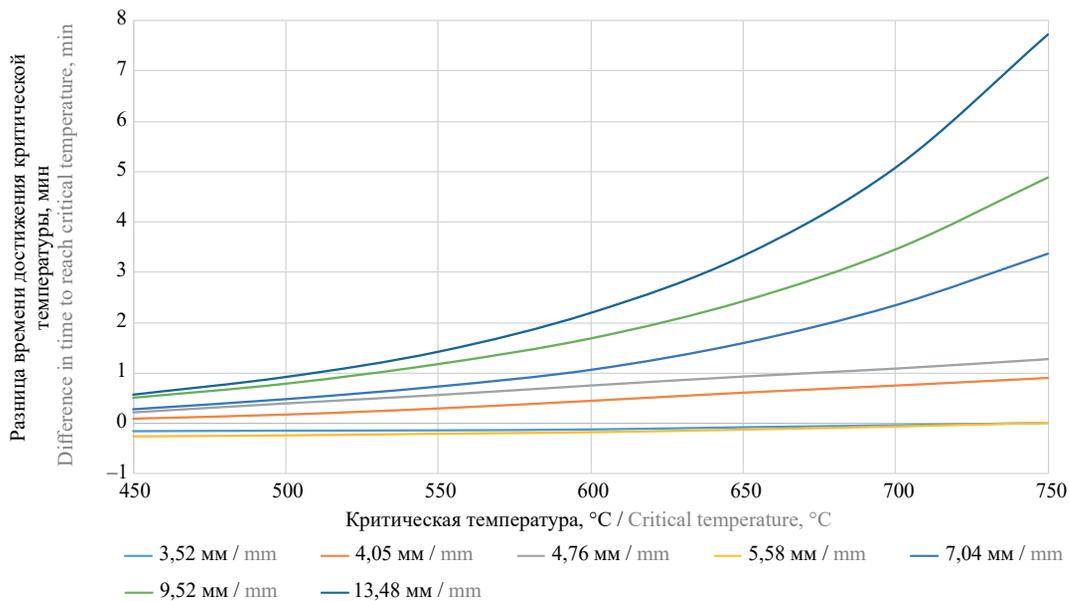


Рис. 17. Разница времени достижения критической температуры  
 Fig. 17. Difference in time to reach the critical temperature

**Выводы**

В настоящее время при проектировании зданий и сооружений для решения различных задач применяют численное моделирование физических процессов, в том числе и численное моделирова-

ние прогрева стальных строительных конструкций в условиях высокотемпературного воздействия. Обоснованность увеличения доли численного моделирования при решении теплотехнических задач прогрева стальных строительных конструк-

ций объясняется рядом преимуществ по сравнению с физическим экспериментом.

Оценка сходимости полученных результатов моделирования прогрева стальной строительной конструкции двутаврового сечения методом конечных элементов и их валидация с известными расчетно-аналитическими решениями показали, что применение метода конечных элементов при выполнении теплотехнических расчетов в рамках разработки проектной документации по огнезащите стальных строительных конструкций имеет свои особенности, которые необходимо учитывать для получения требуемой точности решения, а именно:

- применение верифицированного и валидированного программного обеспечения;
- оценка возможности достижения сходимости решения задачи с учетом допустимой погрешности и существующими в наличии вычислительными ресурсами;
- обязательная оценка сходимости решения по шагам сетки и времени с учетом критерия сходимости решения задачи;
- интерпретация полученных результатов моделирования компетентным пользователем применяемого программного продукта.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фёдорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17 : уч. пособие. М. : ДМК Пресс, 2017. 210 с. EDN ZHIOB.
2. Анкудинов В.Е., Афлятунова Д.Д., Кривилев М.Д., Гордеев Г.А. Компьютерное моделирование процессов переноса и деформаций в сплошных средах : уч. пособие. 1-е изд. Ижевск : Изд-во «Удмуртский университет», 2014. 108 с. EDN VBZYDP.
3. Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В. Обзор рынка средств огнезащиты металлоконструкций. Преимущества и недостатки различных видов // Огнезащита XXI века : матер. Всеросс. науч.-практ. конф. М., 2014.
4. Пехотиков А.В. Актуальные вопросы применения средств огнезащиты для стальных конструкций // ЕВРОСТРОЙПРОФИ. 2015. № 79. С. 34–38.
5. Garlock M., Kruppa J., Li G.-Q., Zhao B. White paper on fire behavior of steel structures // NIST GCR 15-984. Gaithersburg, Maryland : NIST, 2014. 20 p. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984
6. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions // Fire Safety Journal. 2018. Vol. 95. Pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
7. Мельдер Е.В., Сивенков А.Б. Эффективность комбинации интумесцентных покрытий для огнезащиты стальных конструкций // Технологии техносферной безопасности. 2022. № 1 (95). С. 49–65. DOI: 10.25257/TTS.2022.1.95.49-65. EDN YUXQQA.
8. Мешалкин Е.А., Болодьян Г.И. Проблемы применения средств огнезащиты // Ройтмановские чтения : матер. VIII науч.-практ. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2020. С. 75–77. EDN LTXTEA.
9. Головина Е.В. Огнезащитная эффективность вспучивающихся покрытий, применяемых на промышленных предприятиях арктического региона // Современные проблемы обеспечения безопасности : сб. матер. XXV Междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 26–27 апреля 2023 года. Екатеринбург : Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 2023. С. 13–15. EDN MQCNAF.
10. Tong C., Zhang S., Zhong T., Fang Z., Liu H. Highly fibrillated and intrinsically flame-retardant nanofibrillated cellulose for transparent mineral filler-free fire-protective coatings // Chemical Engineering Journal. 2021. No. 419 (5). P. 129440. DOI: 10.1016/j.cej.2021.129440
11. Gatheeshgar P., Poologanathan K., Thamboo J., Roy K., Rossi B., Molken T. et al. On the fire behaviour of modular floors designed with optimised cold-formed steel joist // Structures. 2021. No. 30. Pp. 1071–1085. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.01.055
12. Golovanov V., Kryuchkov G. Steel Structures Fire Resistance Assessment under Standardized Fire Temperature Regimes // Fires and Incidents: Prevention, Accident Response. 2021. No. 3. Pp. 52–60.
13. Carreras Guzman N.H., Kozine I., Lundteigen M.A. An integrated safety and security analysis for cyber-physical harm scenarios // Safety Science. 2021. No. 144 (0925). P. 105458. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105458
14. Siddiqui A.A., Ewer J.A., Lawrence P.J., Galea E.R., Frost I.R. Building Information Modelling for performance-based Fire Safety Engineering analysis : a strategy for data sharing // Journal of Building Engineering. 2021. No. 42 (3). P. 102794. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102794
15. Smith T.D., DeJoy D. M., Dyal M.A., Pu Y., Dickinson S. Multi-level safety climate associations with safety behaviors in the fire service // Journal of Safety Research. 2019. No. 69 (2). Pp. 53–60. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.02.005
16. Li P., Liu C., Wang B., Tao Y., Xu Y.-J., Liu Y. et al. Eco-friendly coating based on an intumescent flame-retardant system for viscose fabrics with multi-function properties: Flame retardancy, smoke suppression,

- and antibacterial properties // *Progress in Organic Coatings*. 2021. No. 159 (10). P. 06400. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106400
17. *Morandini F., Santoni P.A., Tramoni J.B., Mell W.E.* Experimental investigation of flammability and numerical study of combustion of shrub of rockrose under severe drought conditions // *Fire Safety Journal*. 2019. No. 108. P. 102836. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102836
  18. *Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., Рудзинский В.П.* Математическое моделирование работы и определение комплекса характеристик вспучивающейся огнезащиты // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 1997. № 3. С. 21–30. EDN PEGZBN.
  19. *Яковлев А.И.* Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 143 с.
  20. *Цвиркун С.В., Круковский П.Г.* Идентификация теплофизических характеристик огнезащитных материалов по экспериментальным данным огневых испытаний // *Промышленная теплотехника*. 2004. Т. 26. № 6. С. 89–93.
  21. *Волков Д.П., Кулиева Л.А., Успенская М.В., Токарев А.В.* Исследование теплопроводности полимерных композиционных материалов // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2009. Т. 52. № 1. С. 75–77. EDN JWZRKV.
  22. *Зверев В.Г., Гольдин В.Д., Несмелов В.В., Цимбалюк А.Ф.* Моделирование тепло- и массопереноса во вспучивающихся огнезащитных покрытиях // *Физика горения и взрыва*. 1998. Т. 34. № 2. С. 90–98. EDN MPACJB.
  23. *Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., Рудзинский В.П.* Математическое моделирование работы огнезащиты, содержащей в своем составе воду // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 1997. Т. 6. № 3. С. 21–30.
  24. *Исаков Г.Н., Кузин А.Я., Перевалов А.В.* Применение компьютерного моделирования при оценке огнезащитной эффективности покрытий // *Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности : докл. на 2-й Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Санкт-Петербург, 20–22 мая 1997.* СПб., 1997. 98 с.
  25. *Еремينا Т.Ю.* Моделирование и оценка огнезащитной эффективности вспучивающихся огнезащитных составов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2003. № 5. С. 22–29.
  26. *Головина Е.В., Беззапонная О.В., Акулов А.Ю.* Методика оценки термостойкости огнезащитных составов интумесцентного типа для объектов нефтегазовой отрасли. Екатеринбург : Уральский институт ГПС МЧС России, 2020. 169 с.
  27. *Голованов В.И., Пехотиков А.В., Павлов В.В.* Оценка огнезащитной эффективности покрытий для стальных конструкций // *Пожарная безопасность*. 2020. № 4 (101). С. 43–54. DOI: 10.37657/vniipr.rp.2020.101.4.004. EDN LRIOTI.
  28. *Юдаев Б.Н.* Техническая термодинамика. Теплопередача : учеб. неэнергетич. спец. вузов. М. : Высшая школа, 1988. 479 с.
  29. *Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л.* Численные методы решения задач тепло- и массообмена : учеб. пособие. Томск : SST, 2016. 92 с.
  30. *Томачаков М.М., Березовская И.Э.* Анализ современного состояния решения обратных задач теплопроводности и их применения // *Universum: технические науки : электрон. научн. журн*. 2022. № 5 (98). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13591> DOI: 10.32743/UniTech.2022.98.5.13591
  31. *Яковлев А.И.* О расчете огнестойкости стальных конструкций на основе применения ЭВМ // *Огнестойкость строительных конструкций*. М. : ВНИИПО МВД СССР, 1973. Вып. 1. С. 3–18.
  32. *Зайцев А.М., Болгов В.А.* Численное моделирование прогресса строительных конструкций для определения коэффициента теплоотдачи при пожарах // *Вестник Воронежского института ГПС МЧС России*. 2015. № 1 (14). С. 18–25. EDN TSVNLR.
  33. *Баширицев М.П.* Задачник по теплопередаче в пожарном деле. М. : Изд-во ВШ МВД СССР, 1975. 228 с.
  34. *Взрывобезопасность и огнестойкость в строительстве / под ред. Н.А. Стрельчука.* М. : Стройиздат, 1970. 127 с.
  35. *Молчадский И.С.* Пожар в помещении. М. : ВНИИПО, 2005. 456 с.
  36. *Минайлов Д.А.* Исследование огнестойкости стальных конструкций покрытия складских зданий в условиях различного температурного воздействия // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 3. С. 54–65. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.54-65
  37. *Perera D., Upasiri I.R., Poologanathan K., Gatheeshgar P., Sherlock P., Hewavitharana T. et al.* Energy performance of fire rated LSF walls under UK climate conditions // *Journal of Building Engineering*. 2021. No. 44 (3). P. 103293. DOI: 10.1016/j.job.2021.103293

38. De Silva D., Nuzzo I., Nigro E., Occhiuzzi A. Intumescent Coatings for Fire Resistance of Steel Structures: Current Approaches for Qualification and Design // *Coatings*. 2022. No. 12. P. 696. DOI: 10.3390/coatings12050696
39. De Silva D., Bilotta A., Nigro E. Approach for modelling thermal properties of intumescent coating applied on steel members // *Fire Safety Journal*. 2020. No. 116. P. 103200. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103200
40. Zhang C., Li G.Q., Wang Y.-C. Probabilistic analysis of steel columns protected by intumescent coatings subjected to natural fires // *Structural Safety*. 2014. No. 5. Pp. 16–26. DOI: 10.1016/j.strusafe.2014.03.005
41. Еремина Т.Ю., Минайлов Д.А. Исследование влияния температурного режима пожара на эффективность вспучивающегося огнезащитного покрытия, предназначенного для огнезащиты стальных конструкций // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2023. Т. 32. № 2. С. 44–58. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.44-58. EDN LWVMZJ.
42. Beh J.H., Yew M.C., Saw L.H., Yew M.K. Fire Resistance and Mechanical Properties of Intumescent Coating Using Novel BioAsh for Steel // *Coatings*. 2020. No. 10. P. 1117. DOI: 10.3390/coatings1011117
43. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures : a review // *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. No. 162 (9). P. 105712. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105712

## REFERENCES

1. Fedorova N.N., Walger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. *Fundamentals of work in ANSYS 17*. Moscow, DMK Press, 2017; 210. EDN ZIIIOB. (rus).
2. Ankudinov V.E., Aflyatunova D.D., Krivilev M.D., Gordeev G.A. *Computer modeling of transfer and deformation processes in continuous media : a textbook. 1st edition*. Izhevsk, Udmurt University Publishing House, 2014; 108. EDN VBZYDP. (rus).
3. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.V. *Market overview of fire protection products for metal structures. Advantages and disadvantages of various types*. Moscow, Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference “Fire Protection of the XXI century”, 2014. (rus).
4. Pekhotikov A.V. Topical issues of the use of fire protection products for steel structures. *Eurostroyprofi*. 2015; 79:34-38. (rus).
5. Garlock M., Kruppa J., Li G.-Q., Zhao B. White paper on fire behavior of steel structures. *NIST GCR 15-984*. Gaithersburg, Maryland, NIST, 2014; 20. DOI: 10.6028/nist.gcr.15-984
6. Lucherini A., Giuliani L., Jomaas G. Experimental study of the performance of intumescent coatings exposed to standard and non-standard fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2018; 95:42-50. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.004
7. Melder E.V., Sivenkov A.B. The effectiveness of a combination of intumescent coatings for fire protection of steel structures. *Technosphere safety technologies*. 2022; 1(95):49-65. DOI: 10.25257/TTS.2022.1.95.49-65. EDN YUXQQA. (rus).
8. Meshalkin E.A., Bolodyan G.I. Problems of using fire protection products. *Roitman readings : mater. VIII scientific and practical conference*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2020; 75-77. EDN LTXTEA. (rus).
9. Golovina E.V. Flame-retardant effectiveness of bulging coatings used in industrial enterprises of the Arctic region. *Modern security issues : Proceedings of the XXV International Scientific and Practical Conference, Yekaterinburg, April 26-27, 2023*. Yekaterinburg, Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2023; 13-15. EDN MQCNAF. (rus).
10. Tong C., Zhang S., Zhong T., Fang Z., Liu H. Highly fibrillated and intrinsically flame-retardant nanofibrillated cellulose for transparent mineral filler-free fire-protective coatings. *Chemical Engineering Journal*. 2021; 419(5):129440. DOI: 10.1016/j.cej.2021.129440
11. Gatheeshgar P., Poologanathan K., Thamboo J., Roy K., Rossi B., Molkens T. et al. On the fire behaviour of modular floors designed with optimised cold-formed steel joist. *Structures*. 2021; 30:1071-1085. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.01.055
12. Golovanov V., Kryuchkov G. Steel Structures Fire Resistance Assessment under Standardized Fire Temperature Regimes. *Fires and Incidents: Prevention, Accident Response*. 2021; 3:52-60.
13. Carreras Guzman N.H., Kozine I., Lundteigen M.A. An integrated safety and security analysis for cyber-physical harm scenarios. *Safety Science*. 2021; 144(0925):105458. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105458
14. Siddiqui A.A., Ewer J.A., Lawrence P.J., Galea E.R., Frost I.R. Building Information Modelling for performance-based Fire Safety Engineering analysis : a strategy for data sharing. *Journal of Building Engineering*. 2021; 42(3):102794. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102794

15. Smith T.D., DeJoy D.M., Dyal M.A., Pu Y., Dickinson S. Multi-level safety climate associations with safety behaviors in the fire service. *Journal of Safety Research*. 2019; 69(2):53-60. DOI: 10.1016/j.jsr.2019.02.005
16. Li P., Liu C., Wang B., Tao Y., Xu Y.-J., Liu Y. et al. Eco-friendly coating based on an intumescent flame-retardant system for viscose fabrics with multi-function properties: Flame retardancy, smoke suppression, and antibacterial properties. *Progress in Organic Coatings*. 2021; 159(10):06400. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106400
17. Morandini F., Santoni P.A., Tramoni J.B., Mell W.E. Experimental investigation of flammability and numerical study of combustion of shrub of rockrose under severe drought conditions. *Fire Safety Journal*. 2019; 108:102836. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102836
18. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Rudzinsky V.P. Mathematical modeling of operation and determination of complex characteristics of bulging fire protection. *Fire and explosion safety*. 1997; 3:21-30. EDN PEGZBN. (rus).
19. Yakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat, 1988; 143. (rus).
20. Tsvirkun S.V., Krukovsky P.G. Identification of thermophysical characteristics of flame-retardant materials based on experimental fire test data. *Industrial Heat engineering*. 2004; 26(6):89-93. (rus).
21. Volkov D.P., Kulieva L.A., Uspenskaya M.V., Tokarev A.V. Investigation of thermal conductivity of polymer composite materials. *News of higher educational institutions. Instrument engineering*. 2009; 52(1):75-77. (rus).
22. Zverev V.G., Goldin V.D., Nesmelov V.V., Tsybalyuk A.F. Modeling of heat and mass transfer in bulging flame-retardant coatings. *Physics of combustion and explosion*. 1998; 34(2):90-98. EDN MPACJB. (rus).
23. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Rudzinsky V.P. Mathematical modeling of fire protection containing water in its composition. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 1997; 6(3):21-30. (rus).
24. Isakov G.N., Kuzin A.Ya., Perevalov A.V. Application of computer modeling in assessing the flame-retardant effectiveness of coatings. *Dokl. 2 All-Russian Scientific and Practical conference with international with the participation of "New in ecology and life safety". Saint Petersburg, May 20-22, 1997*. St. Petersburg, 1997; 98. (rus).
25. Eremina T.Yu. Modeling and evaluation of the flame-retardant effectiveness of bulging flame retardants. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2003; 5:22-29. (rus).
26. Golovina E.V., Bezzaponnaya O.V., Akulov A.Yu. *Methodology for assessing the heat resistance of intumescent flame retardants for oil and gas industry facilities*. Yekaterinburg, 2020; 173. (rus).
27. Golovanov V.I., Pekhotikov A.V., Pavlov V.I. Evaluation of flame-retardant effectiveness of coatings for steel structures. *Fire safety*. 2020; 4(101):43-54. DOI: 10.37657/vniipo.pb.2020.101.4.004. EDN LRIOTI. (rus).
28. Yudaev B.N. *Technical thermodynamics. Heat transfer : textbook of non-energy spec. universities*. Moscow, Higher School, 1988; 479. (rus).
29. Krainov A.Yu., Minkov L.L. *Numerical methods for solving problems of heat and mass transfer : textbook stipend*. Tomsk, SST, 2016; 92. (rus).
30. Tomochakov M.M., Berezovskaya I.E. Analysis of the current state of solving inverse problems of heat conduction and their application. *Universum: technical sciences : electronic. scientific journal*. 2022; 5(98). URL: <https://7universum.com/ru/tech/arhive/item/13591/> (rus).
31. Yakovlev A.I. On the calculation of fire resistance of steel structures based on the use of computers. *Fire resistance of building structures*. Moscow, VNIPO of the USSR Ministry of Internal Affairs, 1973; 1:3-18. (rus).
32. Zaitsev A.M., Bolgov V.A. Numerical modeling of heating of building structures to determine the coefficient of heat transfer in case of fires. *Bulletin of the Voronezh Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2015; 1(14):19-26. EDN TSVNLR. (rus).
33. Bashkirtsev M.P. *Task book on heat transfer in firefighting*. Moscow, Publishing House of the Higher School of Internal Affairs of the USSR, 1975; 228. (rus).
34. *Explosion safety and fire resistance in construction / ed. by N.A. Strelchuk*. Moscow, Stroyizdat, 1970; 127. (rus).
35. Molchadskiy I.S. *Fire in the room*. Moscow, VNIPO, 2005; 456. (rus).
36. Minailov D.A. Investigation of fire resistance of steel structures covering warehouse buildings under various temperature conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):54-65. DOI: 10.22227/PVB.2020.29.03.54-65 (rus).
37. Perera D., Upasiri I.R., Poologanathan K., Gatheeshgar P., Sherlock P., Hewavitharana T. et al. Energy performance of fire rated LSF walls under UK climate conditions. *Journal of Building Engineering*. 2021; 44(3):103293. DOI: 10.1016/j.job.2021.103293
38. De Silva D., Nuzzo I., Nigro E., Occhiuzzi A. Intumescent Coatings for Fire Resistance of Steel Structures: Current Approaches for Qualification and Design. *Coatings*. 2022; 12:696. DOI: 10.3390/coatings12050696

39. De Silva D., Bilotta A., Nigro E. Approach for modelling thermal properties of intumescent coating applied on steel members. *Fire Safety Journal*. 2020; 116:103200. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103200
40. Zhang C., Li G.Q., Wang Y.-C. Probabilistic analysis of steel columns protected by intumescent coatings subjected to natural fires. *Structural Safety*. 2014; 5:16-26. DOI: 10.1016/j.strusafe.2014.03.005
41. Eremina T.Yu., Minailov D.A. Investigation of the effect of the fire temperature regime on the effectiveness of a bulging flame-retardant coating intended for fire protection of steel structures. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and explosion safety*. 2023; 32(2):44-58. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.02.44-58. EDN LWVMZJ. (rus).
42. Beh J.H., Yew M.C., Saw L.H., Yew M.K. Fire Resistance and Mechanical Properties of Intumescent Coating Using Novel BioAshfor Steel. *Coatings*. 2020; 10:1117. DOI: 10.3390/coatings1011117
43. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures : a review. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 162(9):105712. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.105712

*Поступила 14.11.2024, после доработки 09.01.2025;*

*принята к публикации 11.01.2025*

*Received November 14, 2024; Received in revised form January 9, 2025;*

*Accepted January 11, 2025*

### Информация об авторах

**ЕРЕМИНА Татьяна Юрьевна**, д.т.н., профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0000-0003-1427-606X; Scopus AuthorID: 56893573700; e-mail: da-vip@mail.ru

**МИНАЙЛОВ Денис Александрович**, начальник научно-исследовательского сектора отдела 2.4, 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: 0000-0001-9811-3908; ResearcherID: AAI-2064-2020; Scopus AuthorID: 57207307581; e-mail: minailov-denis@mail.ru

#### Вклад авторов:

**Еремина Т.Ю.** — научное руководство; концепция исследования.

**Минайлов Д.А.** — проведение математического моделирования; написание исходного текста и доработка текста статьи.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

### Information about the authors

**Tayana Yu. EREMINA**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1427-606X; Scopus AuthorID: 56893573700; e-mail: da-vip@mail.ru

**Denis A. MINAILOV**, Head of the Research Sector of Department 2.4, 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: 0000-0001-9811-3908; ResearcherID: AAI-2064-2020; Scopus AuthorID: 57207307581; e-mail: minailov-denis@mail.ru

#### Contribution of the authors:

**Eremina T.Yu.** — scientific guidance; research concept.

**Minailov D.A.** — research; writing the source text and finalizing the text of the article.

*The authors declare no conflicts of interests.*