

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 3. С. 57–66
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(3):57-66

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.84:624.014

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.03.57-66>

Аппроксимационная формула для расчета огнестойкости незащищенных стальных конструкций

Юрий Константинович Маликов, Александр Анатольевич Титаев ✉, Вячеслав Олегович Серебренников

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При проектировании зданий требуется оценить фактические пределы огнестойкости незащищенных стальных конструкций. Удобным инструментом для получения такой оценки являются номограммы. Практическая необходимость интеграции «ручной» технологии и современных средств автоматизации проектирования делает актуальной задачу «оцифровки» номограмм путем создания вычислительных моделей данных.

Цели и задачи. Целью работы было получение достаточно простой формулы для расчета предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций. Были решены следующие задачи: сопоставление литературных данных по пределам огнестойкости с результатами расчетов по нормативному документу по пожарной безопасности ВНПБ 73–18; расчет четырехзначной таблицы пределов огнестойкости для последующей аппроксимации функциональной зависимости.

Методы. Таблица значений огнестойкости вычислена с четырьмя верными знаками с помощью многошагового метода Адамса переменного порядка. Формула для расчета предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций получена методом последовательной аппроксимации табличных данных сначала по одной переменной (приведенная толщина), а затем по другой (критическая температура).

Результаты и обсуждение. Расчет по методике ВНПБ 73–18 дает пределы огнестойкости, близкие к реперным значениям, которые были опубликованы А.И. Яковлевым в 1985 г. Принятые в методике ВНПБ 73–18 значения конвективного и радиационного коэффициентов теплоотдачи соответствуют испытаниям на огнестойкость согласно ГОСТ 30247.0–94 (ИСО 834–75).

Выводы. Получена аппроксимационная формула, вычисления по которой дают те же самые пределы огнестойкости, что и расчеты по методике ВНПБ 73–18. Относительная погрешность аппроксимации не превышает 0,5 % в диапазоне изменения параметров: критическая температура — от 500 до 700 °С; приведенная толщина — от 3 до 12 мм.

Ключевые слова: металлические конструкции; пределы огнестойкости; математическое моделирование; эмпирические зависимости; номограмма

Благодарности. Авторы выражают признательность А.Ю. Маликову за помощь в обзоре эволюции граничных условий для теплотехнических расчетов.

Для цитирования: Маликов Ю.К., Титаев А.А., Серебренников В.О. Аппроксимационная формула для расчета огнестойкости незащищенных стальных конструкций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 3. С. 57–66. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.57-66.

✉ Титаев Александр Анатольевич, e-mail: a.a.titaev@urfu.ru

Approximation formula for calculating fire resistance of unprotected steel structures

Yuri K. Malikov, Aleksandr A. Titaev ✉, Vyacheslav O. Serebrennikov

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When designing buildings it is necessary to estimate the actual fire resistance limits of unprotected steel structures. Nomograms are a convenient tool for obtaining such an assessment. Practical necessity of integration of “manual” technology and modern means of design automation makes the task of “digitization” of nomograms by creating computational data models urgent.

Goals and objectives. The purpose of the work was to obtain a rather simple formula for calculating the fire resistance limits of unprotected steel structures. The following tasks were solved: comparison of the literature data on fire resistance limits with the results of calculations according to the normative document on fire safety “VNPB 73–18”; calculation of a four-digit table of fire resistance limits for the subsequent approximation of functional dependence.

Research methods. The table of fire resistance values is calculated with four correct digits using the Adams multistep method of variable order. The formula for calculation of fire resistance limit of unprotected steel structures was obtained by successive approximation of tabular data first by one variable (thickness, i.e. reciprocal of the section factor) and then by another (critical temperature).

Results and discussion. Calculation according to the methodology VNPB 73–18 gives the fire resistance limits close to the reference values, which were published by A.I. Yakovlev in 1985. The values of convective and radiation heat transfer coefficients adopted in the VNPB 73–18 method correspond to the fire resistance tests according to GOST 30247.0–94 (ISO 834–75).

Conclusions. An approximation formula was obtained, the calculations according to which give the same fire resistance limits as the calculations according to the VNPB 73–18 method. Relative error of approximation does not exceed 0.5 % in the range of parameters change: critical temperature — from 500 to 700 °C; thickness — from 3 to 12 mm.

Keywords: metal structures; fire resistance limits; mathematical modelling; empirical relations; nomogram

Acknowledgments. The authors express their gratitude to A.Yu. Malikov for help in reviewing the evolution of boundary conditions for thermal engineering calculations.

For citation: Malikov Yu.K., Titaev A.A., Serebrennikov V.O. Approximation formula for calculating fire resistance of unprotected steel structures *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(3):57-66. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.03.57-66 (rus).

✉ Aleksandr Anatolyevich Titaev, e-mail: a.a.titaev@urfu.ru

Введение

Определение пределов огнестойкости стальных конструкций основывается на результатах огневых испытаний по ГОСТ 30247.0–94¹. В качестве альтернативы в стандарте СТО АРСС 11251254.001-018–03² описан метод расчета, дающий огнестойкость, эквивалентную той, которая была бы достигнута при стандартных огневых испытаниях [1, 2]. Стандарт согласован и зарегистрирован в качестве нормативного документа по пожарной безопасности с присвоением шифра «ВНПБ 73–18» (письмо МЧС РФ от 31.08.2018 № 19-2-4–1672).

Пределы огнестойкости незащищенных стальных конструкций в обязательном порядке определяются при проектировании огнезащиты (ГОСТ Р 59637–2021, приложение А)³. Кроме этого, этот параметр часто используется для подтверждения адекватности результатов теплотехнических расчетов [3–6]. Небольшая таблица реперных значений огнестойкости (далее — таблица РЗО) была опубликована профессором А.И. Яковлевым⁴. Здесь приведено всего лишь 6 значений огнестойкости для одной критической температуры 500 °C, тогда как обычно этот

параметр лежит в диапазоне от 500 до 700 °C. Кроме того, значения огнестойкости в этой таблице указаны с двумя верными знаками, что приводит к ошибкам округления до ± 4 %.

Конечно, относительная погрешность пределов огнестойкости ± 4 % соответствует общей неопределенности огневых испытаний. Результаты измерения пределов огнестойкости по ГОСТ¹ считаются приемлемыми, если максимальное и минимальное значения для двух испытанных образцов отличаются не более чем на 20 % (от большего значения). Эта неопределенность отражается в протоколе огневых испытаний, где результат округляется до чисел из следующего ряда: 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 360.

Однако погрешность ± 4 % кажется чрезмерно большой, когда реперные значения огнестойкости используются для тестирования вычислительного кода. Положение об аттестации программных средств требует строгого соответствия между получаемыми результатами и установленными расчетными методиками⁵.

В качестве примера приведем табл. 2.3 из монографии [7]. В этой таблице приводится протокол расчета прогрева незащищенной стальной конструкции согласно правилам проектирования⁶. Полученный результат отличается от правильного всего лишь на 2 %, но это различие свидетельствует об ошибке

¹ ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования (ИСО 834–75).

² СТО АРСС 11251254.001-018–03 (ВНПБ 73–18). Проектирование огнезащиты несущих стальных конструкций с применением различных типов облицовок.

³ ГОСТ Р 59637–2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Средства противопожарной защиты зданий и сооружений. Средства огнезащиты. Методы контроля качества огнезащитных работ при монтаже (нанесении), техническом обслуживании и ремонте (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 24.08.2021 № 790-ст).

⁴ Пособие по определению пределов огнестойкости конструкций, пределов распространения огня по конструкциям и групп возгораемости материалов (к СНиП 11-2–80). Табл. 11. М. : СТРОЙИЗДАТ, 1985.

⁵ Приказ Госатомнадзора РФ от 28.12.2000 № 122 (ред. от 13.12.2001. п. 19). Об утверждении и введении в действие Требований к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии, и изменения № 1 в Положение об аттестации программных средств, используемых при обосновании или обеспечении безопасности ядерно и/или радиационно опасных объектов и производств.

⁶ EN 1993-1-2. Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-2: General rules — Structural fire design. 1995.

в VBA-коде, который использовался для заполнения табл. 2.3.

В настоящей работе методика ВНПБ 73–18² использовалась для актуализации составленной А.И. Яковлевым таблицы РЗО незащищенных стальных конструкций с указанием 4 значащих цифр и добавлением данных для критических температур 600 и 700 °С. Эти данные сопоставлены с расчетами по европейским стандартам. Для целей проектирования огнезащиты и тестирования разнообразных программных средств предложена эмпирическая формула, погрешность которой не превышает 0,5 % в диапазоне параметров: критическая температура — от 500 до 700 °С; приведенная толщина — от 3 до 12 мм.

Расчет огнестойкости по методике ВНПБ 73–18²

Тепловое воздействие пожара задается результирующим тепловым потоком, который подводится к поверхности конструкции за счет излучения и конвекции:

$$q_M = q_c + q_r; \quad (1)$$

$$q_c = \alpha \cdot (T_F - T_M); \quad (2)$$

$$q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_F^4 - T_M^4); \quad (3)$$

$$T_F = t_F + T_T, \quad T_M = t_M + T_T; \quad (4)$$

$$t_F = 20 + 345 \cdot \lg\left(\frac{2}{15} \cdot \tau + 1\right), \quad (5)$$

где q — плотность теплового потока, Вт/м²;

t и T — температура, °С и К соответственно;

τ — время от начала пожара, с.

Индексы обозначают: M — металл; c — конвекция; r — излучение; F — пламя.

Остальные обозначения приведены в табл. 1.

Результатом теплового воздействия пожара является нагрев стальной конструкции. При известных допущениях [9] этот процесс описывается обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\frac{\partial t_M}{\partial \tau} = \frac{q_M}{\rho_M C_M S_M}, \quad (6)$$

где S_M — приведенная толщина стальной конструкции, м;

C_M — удельная теплоемкость металла, которая в методике ВНПБ 73–18² определяется как линейная функция температуры:

$$C_M = 310 + 0,48 T_M. \quad (7)$$

Таблица 1. Принятые в методике ВНПБ 73–18² значения параметров теплового воздействия стандартного пожара
Table 1. Values of thermal impact parameters of a standard fire, adopted in the VNPB 73–18² method

Номер по порядку Number in order	Наименование параметра Parameter name	Обозначение Symbol	Размерность Dimension	Значение Value
1	Коэффициент теплоотдачи конвекцией Convection heat transfer coefficient	α	Вт/(м ² ·К) W/(m ² ·K)	29
2	Приведенная степень черноты Apparent emissivity	ε	—	0,5629
3	Постоянная Стефана — Больцмана* Stefan-Boltzmann constant*	σ	Вт/(м ² ·К ⁴) W/(m ² ·K ⁴)	$5,77 \cdot 10^{-8}$
4	Тройная точка воды Triple point of water	T_τ	К	273
5	Плотность стали* Steel density*	ρ_M	кг/м ³ kg/m ³	7800

* Нестандартное значение этих констант общепринято в Российской пожарно-технической литературе [4, 8–10].

* Non-standard values of these constants are generally accepted in Russian fire-technical literature [4, 8–10].

Предел огнестойкости конструкции с приведенной толщиной S определяется как время $R(S, \theta)$ необходимое для прогрева конструкции до критической температуры θ .

Уравнение (6) интегрировалось с помощью программы ODE113 из библиотеки MATLAB. Программа реализует многошаговый метод Адамса переменного порядка и обеспечивает решение задачи с контролируемой точностью: абсолютная погрешность не более 0,01 °С. Полученные значения пределов огнестойкости тестировались путем повторного интегрирования уравнения (6) с применением явной разностной схемы с постоянным шагом по времени, приблизительно равным 0,04 с.

Сопоставление с другими моделями

Приведенная степень черноты ε в уравнении (3) является ключевым параметром модели теплового воз-

действия пожара. В методике ВНПБ 73–18² для определения ε используется рекомендованная А.И. Яковлевым [9] формула:

$$\varepsilon = 1 / (1 / 0,85 + 1 / \varepsilon_m - 1), \quad (8)$$

где 0,85 — степень черноты излучающей поверхности;

ε_m — степень черноты обогреваемой поверхности.

Эта формула известна как приближение диатермической среды. Продукты сгорания топлива в рабочем пространстве испытательной печи считаются прозрачными для излучения [10]. В качестве нагревателя рассматривается футеровка печи. Конечно, такое допущение не соответствует общепринятым моделям радиационного теплообмена в пламенных печах [11, 12].

«В связи с отсутствием экспериментальных данных» в работе А.И. Яковлева [9] не указано адаптированное к результатам огневых испытаний значение ε_m . В работах [4, 8, 13] использовали $\varepsilon_m = 0,74$, что существенно отличается от нормируемого методикой ВНПБ 73–18² и рекомендуемого в [2] значения $\varepsilon_m = 0,625$. Возникает вопрос: какому значению ε_m отвечают приведенные в Таблице РЗО расчетные данные А.И. Яковлева?

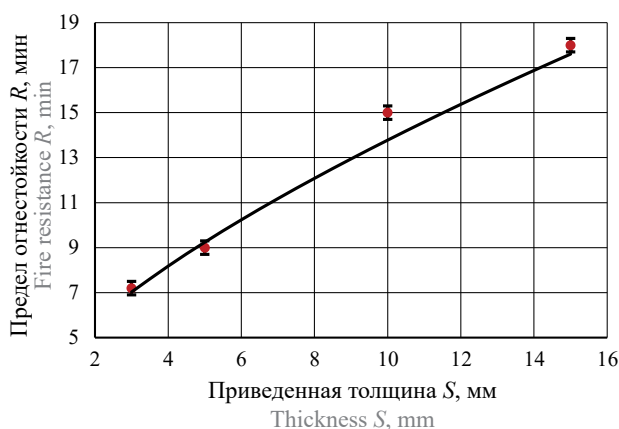
Сплошная линия на рисунке отражает результаты расчета по методике ВНПБ 73–18². Данные А.И. Яковлева показаны на рисунке точками с планками ошибок, которые соответствуют $\pm 0,3$ мин или 1/2 единицы последнего десятичного знака, указанного в Таблице РЗО. Видно, что методика ВНПБ 73–18² идентична той, которую использовал А.И. Яковлев в своих работах. Выпадающее значение $R = 15$ мин при $S = 10$ мм является опечаткой: вместо неверного $R = 0,25$ ч следует читать $R = 0,23$ ч.

В работе [2] расчеты по методике ВНПБ 73–18² сопоставлены с номограммами прогрева незащищенных стальных пластин, которые были получены в результате обработки опытных данных. Рассчитанная огнестойкость отклоняется от сглаженных опытных данных не более чем на 6,6 %.

Таблица 2. Расчетная огнестойкость незащищенных стальных конструкций (в минутах) по различным моделям: А — ВНПБ 73–18²; В — ENV 1993-1-2:1995⁶

Table 2. Calculated fire resistance of unprotected steel structures (in minutes) according to different models: А — VNPB 73–18²; В — ENV 1993-1-2:1995⁶

Критическая температура, °C Critical temperature, °C	Модель Model	Приведенная толщина, мм Thickness, mm					
		3	5	10	15	20	30
500	A	7,028	9,240	13,78	17,60	21,03	27,16
	B	7,470	9,871	14,79	18,94	22,65	29,31
600	A	9,511	12,05	17,42	21,99	26,09	33,44
	B	10,09	12,88	18,75	23,73	28,21	36,23
700	A	14,11	16,51	22,40	27,65	32,43	41,03
	B	14,99	17,84	24,51	30,37	35,69	45,26



Огнестойкость незащищенных стальных конструкций при критической температуре 500 °C

Fire resistance of unprotected steel structures at critical temperature 500 °C

В сентябре 1995 г. был опубликован проект стандарта⁶, в котором приведена модель прогрева незащищенных стальных конструкций под воздействием стандартного пожара (п. 4.2.5.1). Эта модель так же, как и методика ВНПБ 73–18², обобщала результаты огневых испытаний по ИСО 834–75¹. В ней использовалось то же самое значение $\varepsilon_m = 0,625$, а приведенная степень черноты определялась как:

$$\varepsilon = \varepsilon_f \varepsilon_m, \quad (9)$$

где ε_f — излучательная способность пламени.

В стандарте⁶ принималось $\varepsilon_f = 0,8$, $\varepsilon_m = 0,625$, так что $\varepsilon = 0,5$. Такое низкое значение приведенной степени черноты является единственным отличием модели ENV 1993-1-26 от современной модели прогрева незащищенных стальных конструкций под воздействием стандартного пожара (см. EN 1993-1-26 и EN 1991-1-2⁷). Расчет по стандарту ENV 1993-1-2:1995⁶ давал огнестойкость на 6...10 % выше, чем расчет по методике ВНПБ 73–18² (табл. 2).

⁷ EN 1991-1-2 (2002) (English): Eurocode 1: Actions on structures — Part 1-2: General actions — Actions on structures exposed to fire.

Удовлетворительное совпадение расчетных данных из различных источников подтверждает обоснованность принятого в методике ВНПБ 73–18² значения приведенной степени черноты обогреваемой поверхности $\varepsilon_m = 0,625$. Конечно, такое значение степени черноты стальной поверхности характерно для конкретных условий проведения огневых испытаний по стандарту ИСО 834–75¹. Другим условиям огневого воздействия могут соответствовать другие значения ε_m . Например, в расчетно-экспериментальных исследованиях нагрева металла в пламенных печах [12] чаще всего используется значение $\varepsilon_m = 0,8$.

Эволюция моделей теплового воздействия пожара

В формуле (9) в качестве греющей среды рассматривается пламя, которое излучает, поглощает, но не рассеивает тепловое излучение. В европейской пожарно-технической литературе 70-х годов прошлого века упоминается, что наблюдаемое при натурных испытаниях значение излучательной способности пламени лежит в пределах $\varepsilon_f = 0,6 \dots 0,9$. В стандарте ENV 1993-1-2:1995⁶ принято среднее значение $\varepsilon_f = 0,8$, а в методике ВНПБ 73–18² $\varepsilon_f = 0,85$. Это означает, что измеряемая пирометром полного излучения яркостная температура рабочего пространства испытательной печи должна быть приблизительно на 5 % ниже температуры стандартного пожара (5). Для поддержания такого температурного режима испытательной печи ГОСТ 30247.0–94¹ предусматривает управление печью по показаниям термопары с открытым спаем. На практике оказалось, что показания термопары с открытым спаем зависят от конструкции печи. По этой причине трудно ожидать одинаковых результатов огневых испытаний, выполненных в различных центрах. «Расхождения результатов на совершенно идентичных образцах могут достигать 30 %» [14].

В августе 1999 г. был опубликован международный стандарт ИСО 834-1–1999⁸.

Изменения в стандарте ISO 834¹ и европейском стандарте EN 1363⁶ были направлены в первую очередь на улучшение воспроизводимости испытаний. Эта цель была достигнута: тепловое воздействие на образец в различных испытательных печах «... теперь более или менее не зависит от топлива и конструкции печи» [15]. Для гармонизации испытаний на огнестойкость использовались два основных инструмента: футеровка печей материалами с низкой

теплопроводностью [16] и контроль температуры с помощью пластинчатых термометров [17, 18].

Регулирование температуры испытательной печи с помощью пластинчатых термометров означает, что яркостная температура пламени в рабочем пространстве испытательной печи будет близка к стандартному значению (5), а излучательная способность пламени в формуле (9) будет близка к единице [19]. Таким образом, побочным, но ожидаемым [15] эффектом гармонизации стало повышение термической жесткости огневых испытаний.

В опубликованном в апреле 2005 г. стандарте⁹ модель теплового воздействия стандартного пожара на незащищенные стальные конструкции приведена в соответствие с американским стандартом¹⁰: $\varepsilon_f = 1,0$; $\varepsilon_m = 0,7$, так что $\varepsilon = 0,7$. Новый норматив ε_m (0,7 вместо 0,625) был получен методом обратного пересчета (by retroactive accounting) результатов огневых испытаний по EN 1363-1:2012¹¹. Таким образом, ε_m является не физической величиной, а безопасным значением подгоночного параметра в модели теплового воздействия пожара.

Точно так же, на результатах огневых испытаний¹² основана принятая в новом европейском стандарте EN 1363–1:2020¹³ ступенчатая температурная зависимость ε_m для горячеоцинкованных стальных элементов: $\varepsilon_m = 0,35$ при $t \leq 500$ °C; $\varepsilon_m = 0,7$ при $t > 500$ °C.

Стандартный метод определения оптических характеристик различных материалов основан на измерении яркостной температуры с помощью пирометра. Такой метод использован в работе [20] для измерения нормально-полусферической излучательной способности (степени черноты) горячеоцинкованного стального листа. При первом нагреве на воздухе до 500 °C степень черноты цинкового покрытия изменяется в пределах 0,1...0,2, что в два раза ниже безопасного норматива $\varepsilon_m = 0,35$.

Более низкий коэффициент излучения для температур до 500 °C позволяет расчетным путем обосновать противопожарную защиту R30 без дополнительных мер в случае толстых профилей и составных конструкций. Примером может служить монолитная бетонная плита по несъемной опалубке из оцинкованного профилированного листа.

⁹ EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-2: General rules — Structural fire design.

¹⁰ ANSI/AISC 360-10. An American National Standard “Specification for Structural Steel Buildings”. June 22, 2010. (п. 4.2.2).

¹¹ EN 1363-1:2012. Fire resistance tests — Part 1: General Requirements.

¹² Gaigl C., Mensinger M. Hot dip galvanized steel constructions under fire exposure. IFireSS 2017 2nd International Fire Safety Symposium Naples, Italy, June 7–9, 2017. URL: <http://www.researchgate.net/publication/322144363> (accessed: February 2, 2024).

¹³ EN 1363-1:2020. Fire resistance tests — Part 1: General requirements.

⁸ ISO 834-1:1999. Fire-resistance tests — Elements of building construction.

Эмпирические формулы

Оцифровка номограмм прогрева незащищенных стальных конструкций (ВНПБ 73–18, прил. А)² облегчает автоматизацию расчетов при проектировании огнезащиты. Если исходить из типичной точности номограмм, то их аппроксимация эмпирическими формулами с относительной погрешностью $\pm 3\%$ может считаться допустимой.

Требования к точности аппроксимации пределов огнестойкости возрастают, когда эмпирические формулы используются для тестирования программных комплексов.

Определенная уверенность в том, что полученный результат совпадает с ожидаемым, появляется при совпадении двух значащих цифр, что соответствует относительной погрешности аппроксимации не более $\pm 0,5\%$. Этому условию отвечают нижеприведенные аналитические выражения для расчета пределов огнестойкости незащищенных стальных конструкций:

$$R(S, \theta) = A(\theta) \left[1 + B(\theta) \ln \left(1 + \frac{S-3}{E(\theta)} \right) \right] \pm 0,5\%, \text{ с,} \quad (10)$$

$$3 \leq S \leq 12 \text{ мм}, \quad 500 \leq \theta \leq 700^\circ\text{C}.$$

Обозначим:

$$X = \frac{\theta}{100} - 5,199; \quad Y = \frac{\theta}{100} - 6,780; \quad Z = \frac{\theta}{100} - 6,834.$$

Тогда:

$$A = 446,1 + X(128,54 + X(28,7 + 7,15 X^2)); \quad (11)$$

$$B = 2,283 + 11,81(0,9927 Y + \sqrt{Y^2 + 0,0467}); \quad (12)$$

$$E = 13,75 + 186,2(1,0028 Z + \sqrt{Z^2 + 0,0543}). \quad (13)$$

Остановимся кратко на методе, с помощью которого была получена формула (10). В последнее время для численного моделирования и оценки воздействия пожара на стальные конструкции стал использоваться аппарат искусственных нейронных сетей [21, 22]. В работах [23, 24] делается попытка определения прочностных свойств стали при воздействии пожара с помощью аппроксимационных полиномиальных моделей. Авторы работы [25] определяют воздействие пожара на стальные конструкции методом Монте-Карло. Нейросетевой подход для расчета предела огнестойкости стальных колонн, наполненных бетоном, сделан в работе [26]. Огнестойкость листовых перегородок из металла с помощью выбора разных функций активации в нейросети исследована авторами [27]. Некоторые аспекты аппроксимации

и интерполяции функций искусственными нейронными сетями рассмотрены в работах [28, 29].

Эти работы показывают огромный потенциал применения нейронных сетей для изучения функциональных зависимостей и создания математических моделей. По существу, единственным недостатком нейросетевой модели является то, что она остается «черным ящиком».

Авторы использовали технологию машинного обучения для распознавания элементарных функций и автоматизированного выбора наиболее подходящей трехпараметрической аппроксиманты (эмпирической зависимости, тенденции, тренда). Подбор оптимальных параметров аппроксиманты выполняется с помощью стандартных программ. Хотя такой подход не является универсальным, он во многих случаях позволяет получить наглядную и удобную для практического использования математическую модель. В частности, формула (10) может быть преобразована к виду:

$$S = 3 + E \left[\exp \left(\frac{R - A}{AB} \right) - 1 \right]. \quad (14)$$

Такая форма записи позволяет определить необходимую приведенную толщину стальной конструкции в зависимости от заданных значений предела огнестойкости и критической температуры.

Практическое применение

Пример 1. Найти минимальную приведенную толщину, при которой предел огнестойкости незащищенной стальной конструкции будет не ниже R15. Предельное значение критической температуры для малонагруженной конструкции составляет 700°C . Расчет по формуле (14) дает $S = 3,74$ мм.

Подробности расчета. Предел огнестойкости $R = 15 \times 60 = 900$ с; критическая температура $\theta = 700^\circ\text{C}$, $X = 1,80$, $Y = 0,22$, $Z = 0,17$, $A = 845,92$, $B = 8,50$, $E = 98,02$.

Пример 2. В работе [4] с помощью программного комплекса ANSYS mechanical моделировался прогрев незащищенной профильной трубы $160 \times 160 \times 5$ под воздействием стандартного пожара. Для критической температуры $\theta = 650^\circ\text{C}$ получен предел огнестойкости $R = 12,7$ мин. Расчет по формуле (10) дает $R = 13,78 \pm 0,07$ мин.

Такое расхождение расчетных данных объясняется тем, что принятое в работе [4] значение степени черноты обогреваемой поверхности $\varepsilon_m = 0,74$ не соответствует нормируемому в методике ВНПБ 73–18² значению $\varepsilon_m = 0,625$.

Подробности расчета. Профильная труба $160 \times 160 \times 5$: площадь сечения 3035,5 кв. мм; обогреваемый периметр 622,83 мм; приведенная толщина

$S = 4,874$ мм. Критическая температура $\theta = 650$ °С, $X = 1,30$, $Y = -0,28$, $Z = -0,33$, $A = 682,39$, $B = 3,18$, $E = 27,22$.

Пример 3. В работе [3] «проведены исследования по вопросам моделирования пожарной нагрузки в программном комплексе ANSYS» и получены следующие результаты: при трехстороннем обогреве стальной балки 25Б1 в режиме стандартного пожара через 7,5 мин достигнута температура 550 °С. Расчет по формуле (10) для критической температуры $\theta = 550$ °С и приведенной толщины 3,903 мм дает $R = 9,723 \pm 0,05$ мин. Расхождение с данными [3] составляет $100(9,23 - 7,5)/9,23 = 19$ %. Причиной столь существенных отличий могут быть ошибки, допущенные при формировании математической модели в многофункциональном комплексе ANSYS.

Подробности расчета. Балка 25Б1: площадь сечения 3268 мм²; обогреваемый периметр 837,4 мм; приведенная толщина $S = 3,903$ мм. Критическая температура $\theta = 550$ °С, $X = 0,30$, $Y = -1,28$, $Z = -1,33$, $A = 487,45$, $B = 2,61$, $E = 16,82$.

Результаты исследования и их обсуждение

В течение длительного времени в России отсутствуют общие правила проектирования стальных конструкций на случай пожара. Для расчета огнестойкости незащищенных стальных конструкций МЧС РФ рекомендовало¹⁴ использовать «апробированные методики», которые можно найти в обширной пожарно-технической литературе.

На практике оказалось, что между этими методиками имеется одно, но существенное отличие. В некоторых из них степень черноты обогреваемой поверхности стальной конструкции принимается равной $\epsilon_m = 0,625$, а в других методиках — $\epsilon_m = 0,74$. Поскольку это расхождение ничем не мотивировано, то, следуя рекомендациям МЧС РФ¹³, проектировщик оказывается на распутье.

В работе сделана попытка устранить сложившуюся неопределенность в российских методи-

ках расчета огнестойкости путем исторического анализа европейских норм. Показана связь между граничными условиями для теплотехнического расчета и общими принципами определения огнестойкости стальных элементов каркаса. Принятое в нормативном документе по пожарной безопасности ВНПБ 73–18² значение $\epsilon_m = 0,625$ соответствует испытаниям на огнестойкость согласно¹. Однако испытания согласно⁸ дают другое значение ϵ_m .

В статье показано, что расчет по методике ВНПБ 73–18² дает пределы огнестойкости, близкие к реперным значениям, которые были опубликованы А.И. Яковлевым⁴.

На основании методики ВНПБ 73–18² составлена четырехзначная таблица пределов огнестойкости стальных конструкций. Табличные значения огнестойкости аппроксимированы с помощью формулы, состоящей из элементарных функций и зависящей от двух параметров: приведенной толщины конструкции и критической температуры.

Выводы

1. Граничные условия для теплотехнического расчета зависят от национального стандарта на испытания на огнестойкость и по этой причине должны определяться в строительных нормах и правилах.

2. Составленная А.И. Яковлевым таблица реперных значений огнестойкости незащищенных стальных конструкций актуализирована на основе методики ВНПБ 73–18² с расширением на критические температуры 600 и 700 °С.

3. В работе получена аппроксимационная формула, вычисления по которой дают те же самые пределы огнестойкости, что и расчеты по методике ВНПБ 73–18². Относительная погрешность аппроксимации не превышает 0,5 % в диапазоне изменения параметров: критическая температура — от 500 до 700 °С; приведенная толщина — от 3 до 12 мм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В., Пронин Д.Г. Стандартизация и внедрение расчетных методов в области огнезащиты несущих стальных конструкций // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXXI Междунар. науч.-практ. конф. М. : ВНИИПО, 2019. С. 26–29.
2. Голованов В.И., Крючков Г.И. Оценка огнестойкости стальных конструкций при нормируемых температурных режимах пожара // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2021. № 3. С. 52–60. DOI: 10.25257/FE.2021.3.52-60
3. Бардин А.В. Моделирование пожарной нагрузки на конструкции в программном комплексе ANSYS // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 6 (45). С. 55–67.

¹⁴ Письмо МЧС РФ № ИГ–117–1–13–2 от 11.01.2021.

4. Минайлов Д.А. Исследование огнестойкости стальных конструкций покрытия складского здания в условиях различного температурного воздействия // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 3. С. 54–65.
5. Симонова М.А., Романов Н.Н., Пермяков А.А., Федоров А.В., Кораблев В.А., Волков Д.П. Расчет температурных полей несущих металлических конструкций в условиях высокотемпературного воздействия для оценки огнестойкости // Вестник Международной академии холода. 2021. № 2. С. 88–97. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-88-97
6. Шебеко Ю.Н., Зубань А.В., Шебеко А.Ю. Расчет фактического предела огнестойкости незащищенных стальных конструкций при различных температурных режимах пожара // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 6. С. 29–34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34
7. Гравит М.В., Дмитриев И.И. Огнестойкость легких стальных тонкостенных конструкций : монография. СПб. : ПОЛИТЕХПРЕСС, 2020. 213 с.
8. Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф., Фролов А.Ю. Огнестойкость строительных конструкций. М. : ЗАО «Спецтехника», 2001. 496 с.
9. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 143 с.
10. Молчадский И.С. Пожар в помещении. М. : ВНИИПО, 2005. 456 с.
11. Невский А.С. Лучистый теплообмен в печах и топках. М. : Metallurgy, 1971. 440 с.
12. Лисиенко В.Г., Волков В.В., Маликов Ю.К. Улучшение топливоиспользования и управление теплообменом в металлургических печах. М. : Metallurgy, 1988. 231 с.
13. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М. : Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. 382 с.
14. Ненахов С.А., Пименова В.П., Пименов А.Л. Проблемы огнезащитной отрасли // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2010. Т. 19. № 12. С. 19–26.
15. Wickstrom U. The adiabatic surface temperature and the plate thermometer // Fire Safety Science-Proceedings of the Tenth International Symposium : International Association for Fire Safety Science. 2011. Pp. 1001–1012. DOI: 10.3801/IAFFS.FSS.10-1001
16. Sultan M.A. Fire resistance furnace temperature measurements: plate thermometers vs shielded thermocouples // Fire Technology. 2006. Vol. 42. No. 3. Pp. 253–267. DOI: 10.1007/s10694-006-8431-7
17. Wickstrom U. The plate thermometer — a simple instrument for reaching harmonized fire resistance tests // Fire Technology. 1994. Vol. 30. No. 2. Pp. 195–208. DOI: 10.1007/BF01040002
18. Cooke G.M.E. Can harmonization of fire resistance furnaces be achieved by plate thermometer control? // Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International Symposium : International Association for Fire Safety Science. 1994. Pp. 1195–1207. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.4-1195
19. Wickstrom U. Temperature Calculation in Fire Safety Engineering : Springer International Publishing Switzerland. 2016. 250 p. DOI: 10.1007/978-3-319-30172-3
20. Elich J.J.P., Hamerlinck A.F. Thermal properties of galvanized steel and its importance in enclosure fire scenarios // Fire Safety Journal. 1990. Vol. 16. Pp. 469–482.
21. Lee E.W.M. Application of artificial neural network to fire safety engineering. Handbook on Decision Making. 2010. Vol. 4. Pp. 369–396. DOI: 10.1007/978-3-642-13639-9_15
22. Hanin B. Universal function approximation by deep neural nets with bounded width and ReLU activations // Mathematics. 2019. Vol. 7. Issue 10. Pp. 1–9. DOI: 10.3390/math7100992
23. de Santana Gomes W.J. Structural reliability analysis using adaptive artificial neural networks // ASME. ASME J. Risk Uncertainty Part B. 2019. Vol. 5. Issue. 4. Pp. 1–8. DOI: 10.1115/1.4047636
24. Chaudhary R.K., Van Coile R., Gernay T. Potential of Surrogate modelling for probabilistic fire analysis of structures // Fire Technology. 2021. Vol. 57. No 3. Pp. 3151–3177. DOI: 10.1007/s10694-021-01126-w
25. Alverlandro Silva Ricardo, Wellison Jose de Santana Gomes. Structural reliability methods applied in analysis of steel elements subjected to fire // Journal of Engineering Mechanics. 2021. Vol. 147. Issue 12. Pp. 4021–4029. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002023
26. Moradi M.J., Kambiz D., Ghazi-nader D., Hajiloo H. The prediction of fire performance of concrete-filled steel tubes (CFST) using artificial neural network // Thin-Walled Structures. 2021. Vol. 161. Issue 12. Pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107499
27. Kesawan S., Rachmadini R., Sabesan S., Janarthanan B. Application of neural networks for light gauge steel fire walls // Engineering Structures. 2023. Vol. 278. Pp. 6–14. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115445
28. Guliyev N.J., Ismailov V.E. Approximation capability of two hidden layer feedforward neural networks with fixed weights // Neurocomputing. 2018. Vol. 316. Pp. 262–269.

29. Almira J.M., Lopez-de-Teruel P.E., Romero-L'opez D.J., Voigtlaender F. Negative results for approximation using single layer and multilayer feedforward neural networks // *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 2021. Vol. 494. Issue 1. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.jmaa.2020.124584

REFERENCES

1. Golovanov V.I., Pavlov V.V., Pekhotikov A.V., Pronin D.G. Standardization and the introduction of calculation methods for fire protection load-carrying steel structures. *Actual problems of fire safety : XXXty problems of fire safetyods for fir*. Moscow, VNIPO, 2019; 26-29. (rus).
2. Golovanov V.I., Kryuchkov G.I. Steel structures fire resistance assessment under standardized fire temperature regimes. *Fires and emergencies: prevention, liquidation*. 2021; 3:52-60. DOI: 10.25257/FE.2021.3.52-60 (rus).
3. Bardin A.V. Fire load modeling on the structure in ANSYS. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016; 6(45):55-67 (rus).
4. Minailov D.A. Investigation of fire resistance of steel structures covering a warehouse building under different temperature conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(3):54-65. (rus).
5. Simonova M.A., Romanov N.N., Permyakov A.A., Fedorov A.V., Korablev V.A., Volkov D.P. Method of engineering calculation of the fire resistance limit for load-bearing metal structures. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021; 2:88-97. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-2-88-97 (rus).
6. Shebeko Yu.N., Zuban A.V., Shebeko A.Yu. An evaluation of an actual fire resistance limit of non-protected steel structures for different temperature regimes of fires. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(6):29-34. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.29-34 (rus).
7. Gravit M.V., Dmitriev I.I. *Fire resistance of light steel framing*. Saint Petersburg, POLITEKHPRESS, 2020; 213. (rus).
8. Mosalkov I.L., Plusnina G.F., Frolov A.Yu. *Fire resistance of building structures*. Moscow, ZAO "Spectekhnika", 2001; 496. (rus).
9. Yakovlev A.I. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 144. (rus).
10. Molchadskii I.S. *Fire in the indoors*. Moscow, VNIPO, 2005; 456. (rus).
11. Nevskii A.S. *Radiant heat transfer in furnaces and firebox*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971:440. (rus).
12. Lisienko V.G., Volkov V.V., Malikov Y.K. *Improved fuel efficiency and control of metal heating in reheat furnaces*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988; 231. (rus).
13. Roitman V.M. *Engineering solutions for assessing the fire resistance of designed and reconstructed buildings*. Moscow, Association "Fire safety and science", 2001; 382. (rus).
14. Nenakhov S.A., Pimenova V.P., Pimenov A.L. Problems of fire protection system. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2010; 19(12):19-26. (rus).
15. Wickstrom U. The adiabatic surface temperature and the plate thermometer. *Fire Safety Science-Proceedings of the Tenth International Symposium : International Association for Fire Safety Science*. 2011; 1001-1012. DOI: 10.3801/IAFFS.FSS.10-1001
16. Sultan M.A. Fire resistance furnace temperature measurements: plate thermometers vs shielded thermocouples. *Fire Technology*. 2006; 42(3):253-267. DOI: 10.1007/s10694-006-8431-7
17. Wickstrom U. The plate thermometer — a simple instrument for reaching harmonized fire resistance tests. *Fire Technology*. 1994; 30(2):195-208. DOI: 10.1007/BF01040002
18. Cooke G.M. Can harmonization of fire resistance furnaces be achieved by plate thermometer control? *Fire Safety Science-Proceedings of the Fourth International Symposium : International Association for Fire Safety Science*. 1994; 1195-1207. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.4-1195
19. Wickstrom U. *Temperature Calculation in Fire Safety Engineering : Springer International Publishing Switzerland*. 2016; 250. DOI: 10.1007/978-3-319-30172-3
20. Elich J.J.P., Hamerlinck A.F. Thermal properties of galvanized steel and its importance in enclosure fire scenarios. *Fire Safety Journal*. 1990; 16:469-482.
21. Lee E.W.M. Application of artificial neural network to fire safety engineering. *Handbook on Decision Making*. 2010; 4:369-396. DOI: 10.1007/978-3-642-13639-9_15
22. Hanin B. Universal function approximation by deep neural nets with bounded width and ReLU activations. *Mathematics*. 2019; 7(10):1-9. DOI: 10.3390/math7100992
23. de Santana Gomes W.J. Structural reliability analysis using adaptive artificial neural networks. *ASME. ASME J. Risk Uncertainty Part B*. 2019; 5(4):1-8. DOI: 10.1115/1.4047636
24. Chaudhary R.K., Van Coile R., Gernay T. Potential of surrogate modelling for probabilistic fire analysis of structures. *Fire Technology*. 2021; 57(3):3151-3177. DOI: 10.1007/s10694-021-01126-w
25. Alverlandro Silva Ricardo, Wellison Jose de Santana Gomes. Structural reliability methods applied in analysis of steel elements subjected to fire. *Journal of Engineering Mechanics*. 2021; 147(12):4021-4029. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002023

26. Moradi M.J., Kambiz D., Ghazi-nader D., Hajiloo H. The prediction of fire performance of concrete-filled steel tubes (CFST) using artificial neural network. *Thin-Walled Structures*. 2021; 161(2):1-17. DOI: 10.1016/j.tws.2021.107499
27. Kesawan S., Rachmadini R., Sabesan S., Janarthanan B. Application of neural networks for light gauge steel fire walls. *Engineering Structures*. 2023; 278:6-14. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115445
28. Guliyev N.J., Ismailov V.E. Approximation capability of two hidden layer feedforward neural networks with fixed weights. *Neurocomputing*. 2018; 316:262-269.
29. Almira J.M., Lopez-de-Teruel P.E., Romero-L'opez D.J., Voigtlaender F. Negative results for approximation using single layer and multilayer feedforward neural networks. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 2021; 494(1):1-10. DOI: 10.1016/j.jmaa.2020.124584

Поступила 07.02.2024, после доработки 29.02.2024;

принята к публикации 11.03.2024

Received February 7, 2024; Received in revised form February 29, 2024;

Accepted March 11, 2024

Информация об авторах

МАЛИКОВ Юрий Константинович, канд. техн. наук, директор научно-исследовательского центра, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; РИНЦ ID: 134294; Scopus AuthorID: 6603995452; ORCID: 0009-0009-4334-7526; e-mail: uma66p@mail.ru

ТИТАЕВ Александр Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; РИНЦ ID: 546224; Scopus AuthorID: 26649649000; ORCID: 0000-0002-3778-7033; e-mail: a.a.titaev@urfu.ru

СЕРЕБРЕННИКОВ Вячеслав Олегович, магистрант, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; ORCID: 0009-0004-7129-3418; e-mail: v.o.serebrennikov@urfu.me

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Yuri K. MALIKOV, Cand. Sci. (Eng.), Head of Research Center, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Mira St., 19, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; ID RISC: 134294; Scopus AuthorID: 6603995452; ORCID: 0009-0009-4334-7526; e-mail: uma66p@mail.ru

Aleksandr A. TITAEV, Cand. Sci (Eng.), Associate Professor, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Mira St., 19, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; ID RISC: 546224; Scopus AuthorID: 26649649000; ORCID: 0000-0002-3778-7033; e-mail: a.a.titaev@urfu.ru

Vyacheslav O. SEREBRENNIKOV, Master's Student, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Mira St., 19, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-7129-3418; e-mail: v.o.serebrennikov@urfu.me

Contribution of the authors: all authors made equivalent contributions to the publication.

The authors declare no conflict of interest.