

УДК 614.841.45

ВАЛІДАЦІЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ МІНІМАЛЬНОЇ ТОВЩИНИ ВОГНЕЗАХИСНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Новак С. В.¹, Новак М. С.^{2*}

¹Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту,

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 01.11.2020

Пройшла рецензування: 16.11.2020

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

валідація, вогнезахисний матеріал, вогнестійкість, мінімальна товщина матеріалу, показники точності, розрахунковий метод, сталева конструкція

АНОТАЦІЯ

Зважаючи на значимість достовірності даних щодо вогнезахисної здатності вогнезахисних матеріалів при визначенні проєктних параметрів об'єктів вогнезахисту, актуальними є дослідження, спрямовані на розвиток методів оцінювання показників якості цих матеріалів, в тому числі в частині показників точності отримуваних результатів. В статті наведено результати дослідження збіжності показників точності європейських і національних методів розрахунку мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів, призначених для захисту сталевих конструкцій, які ґрунтуються на розв'язанні рівняння теплопровідності (зі змінним і сталим коефіцієнтом теплопровідності вогнезахисного матеріалу). Під час цього дослідження для визначення показників точності європейських розрахункових методів використовували процедуру валідації, яка ґрунтується на застосуванні методу обчислювального експерименту. За цією процедурою визначено показники точності європейських методів, які наведено в EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013. Встановлено, що діапазони відхилення між розрахунковими і дійсними величинами мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу для європейських методів зі змінним і сталим коефіцієнтом теплопровідності відповідно становлять від – 2,6 % до 2,4 % і від –0,3 % до 3,5 %. Встановлено, що має місце значна відмінність між значеннями показників точності європейських і національних розрахункових методів, які наведено в ДСТУ Б В.1.1-17:2007. Діапазон відхилення між розрахунковими і дійсними величинами мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу для європейських розрахункових методів значно (у 22,8 рази) менший ніж для національних методів.

Постановка проблеми. Для визначення значень мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів, за яких забезпечується нормована вогнестійкість сталевих конструкцій (колон, балок), застосовують національний стандарт України ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [1]. Результати досліджень границь придатності і точності розрахункових методів, застосованих в цьому національному стандарті, показали, що розрахункові значення мінімальної

товщини вогнезахисного матеріалу можуть значно (у два і більше разів) відрізнятися від їхніх дійсних (точних) величин [2, 3].

Зазначений національний стандарт розроблено на основі положень європейського стандарту ENV 13381-4:2002 [4]. На заміну цьому європейському стандарту впроваджено два європейські стандарти, які визначають методи оцінювання вогнезахисної здатності пасивних (EN 13381-4:2013 [5]) і реактивних (EN 13381-8:2013 [6])

*AndyAnderson1945@gmail.com.

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.83-90>
2518-1777/©2020 ІДУНДЦ ЦЗ

вогнезахисних матеріалів, призначених для вогнезахисту сталевих конструкцій. Процедури, наведені у розрахункових методах цих двох європейських стандартів, мають деякі відмінності від процедур, які подано в національному стандарті ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [1]. Тому можна допустити, що і показники точності європейських розрахункових методів будуть іншими, ніж наведено в [2, 3].

Зважаючи на значимість достовірності даних щодо вогнезахисної здатності вогнезахисних матеріалів при визначенні проєктних параметрів об'єктів вогнезахисту, актуальними слід вважати дослідження, спрямовані на подальше удосконалення і розвиток методів оцінювання показників якості цих матеріалів, в тому числі в частині показників точності отримуваних результатів.

Методи дослідження вогнезахисної здатності. Для визначення значень необхідної мінімальної товщини пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів, призначених для захисту сталевих конструкцій, встановлено методи, які наведено в національному стандарті ДСТУ Б В.1.1-17:2007 [1] і європейських стандартах EN 13381-4:2013 [5], EN 13381-8:2013 [6]. Сутність цих методів полягає у проведенні випробування зразків колон і балок, захищених вогнезахисним матеріалом, з метою отримання даних щодо їхньої температури під час вогневого впливу за стандартним температурним режимом, і обробленні цих даних за одним із встановлених в стандарті розрахункових методів з метою отримання значень мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів, за яких забезпечується нормована вогнестійкість сталевих конструкцій з різною зведеною товщиною сталевого профілю.

У кожному із зазначених вище стандартів наведено такі чотири розрахункові методи визначення значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів: метод числової регресії; два методи, в яких застосовується рівняння теплопровідності (зі змінним і

сталим коефіцієнтом теплопровідності); графічний метод. Відмінності розрахункових методів, наведених у зазначених національному і європейських стандартах, полягають в тому, що європейські методи мають детальні описи, в той час, як в національних методах маю місце невизначеності в деяких розрахункових процедурах.

Результати досліджень границь придатності і точності національних розрахункових методів, показали, що розрахункові значення мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу можуть значно (у два і більше разів) відрізнятись від їхніх дійсних (точних) величин [2, 3]. Найменші відхилення від точних даних отримані при застосуванні методів, в яких використовують рівняння теплопровідності, найбільші відхилення – для методу числової регресії. Під час цих досліджень застосовували процедуру валідації, яка ґрунтується на проведенні обчислювального експерименту [3].

Через наявність відмінностей у національних і європейських розрахункових методах, не виключена можливість того, що і показники точності і границі застосування європейських методів інші, ніж для національних методів. Однак на підтвердження цього припущення не наведені відповідні розрахунки. Тому є підстави вважати, що недостатня визначеність показники точності і границі застосування європейських розрахункових методів, обумовлюють необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

Мета дослідження. Проведені дослідження ставили за мету визначити збіжність результатів оцінювання показників точності європейських [5, 6] і національних [1] методів розрахунку мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів, призначених для захисту сталевих конструкцій, які ґрунтуються на розв'язанні рівняння теплопровідності (зі змінним і сталим коефіцієнтом теплопровідності вогнезахисного матеріалу).

Для досягнення цієї мети вирішували такі завдання:

визначити показники точності вищезазначених європейських методів розрахунку мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів;

оцінити збіжність між значеннями показників точності європейських і національних розрахункових методів.

Виклад основного матеріалу. Розрахункові методи визначення мінімальної товщини пасивних вогнезахисних матеріалів, які ґрунтуються на розв'язанні рівняння теплопровідності (зі змінним і сталим коефіцієнтом теплопровідності) і наведені в європейському стандарті EN 13381-4:2013 [5], в повній мірі відповідають розрахунковим методам, які надано в EN 13381-8:2013 [6] і призначено для оцінювання реактивних вогнезахисних матеріалів. Сутність цих двох розрахункових методів полягає у визначенні коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу на основі експериментальних даних вимірювання температури зразків сталевих конструкцій (колон і балок) і розрахунку значень мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу шляхом розв'язання рівняння теплопровідності. Відмінністю цих розрахункових методів є те, що у методі зі змінним коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_p(\theta_p)$ вогнезахисного матеріалу значення цього коефіцієнту визначають для діапазону температури θ_p від 0 до 1000 °C, а у методі зі сталим коефіцієнтом теплопровідності λ_p – за такою формулою:

$$\lambda_p = c_0 + c_1 \times A_m / V + c_2 \times d_p, \quad (1)$$

де: A_m/V – коефіцієнт поперечного перерізу, м⁻¹;

d_p – товщина вогнезахисного матеріалу, м;
 c_0, c_1, c_2 – коефіцієнти.

Визначення показників точності вищезазначених європейських методів розрахунку мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів, призначених для захисту сталевих конструкцій, здійснювали за процедурою валідації, яка ґрунтується на проведенні

обчислювального експерименту [3]. На першому її етапі шляхом розв'язання нестационарної нелінійної одновимірної прямої задачі теплопровідності із використанням пакету прикладних програм FRIEND-2 [7] визначали значення експериментальної температури зразків сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом. Параметри цих зразків наведено в табл. 1 і вони є такими ж, як і при оцінюванні показників точності відповідних національних методів розрахунку мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів, результати якого надано в [3].

Таблиця 1 – Параметри зразків для проведення обчислювального експерименту

№ зразка	Товщина сталевій конструкції d_a (V/A_m), мм	Товщина вогнезахисного матеріалу d_p , мм
1	14,29	2,141
2	14,29	3,051
3	10,53	3,961
4	8,621	2,141
5	6,536	2,141
6	6,536	3,961
7	4,717	2,141
8	4,717	3,961
9	3,717	3,051
10	3,717	3,961

Джерело: складено авторами

Умови однозначності, які застосовували при розв'язанні прямої задачі теплопровідності, також в повній мірі відповідали наведеним в [3]. Зокрема, задавали такі значення теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу: коефіцієнт теплопровідності $\lambda_p = 0,03$ Вт/(м °C), питома об'ємна теплоємність $c_p \rho_p = 3 \cdot 10^4$ Дж/(м³ °C). На цьому ж етапі для всіх зразків визначали експериментальні проміжки часу t_{exp} досягнення критичної температури сталі в діапазоні від 350°C до 700°C, з кроком 50°C.

Слід відмітити, що результати визначення показників точності

національних методів розрахунку, які подано в [3], отримано із застосуванням програми для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel і їх буде використано для оцінювання їхньої збіжності зі значеннями показників точності європейських розрахункових методів, які визначають даному дослідженні.

На другому етапі за отриманими шляхом розв'язання прямої задачі теплопровідності даними щодо температурного стану десяти зразків

сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом визначали коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного матеріалу. Для програмної реалізації процедур визначення цього коефіцієнта, наведених в європейських стандартах EN 13381-4:2013 [5] і EN 13381-8:2013 [6], було розроблено відповідні блок-схеми (рис. 1, 2) і програмне забезпечення з використанням мови програмування Python 3.7 з інтегрованим середовищем розробки JetBrains PyCharm.

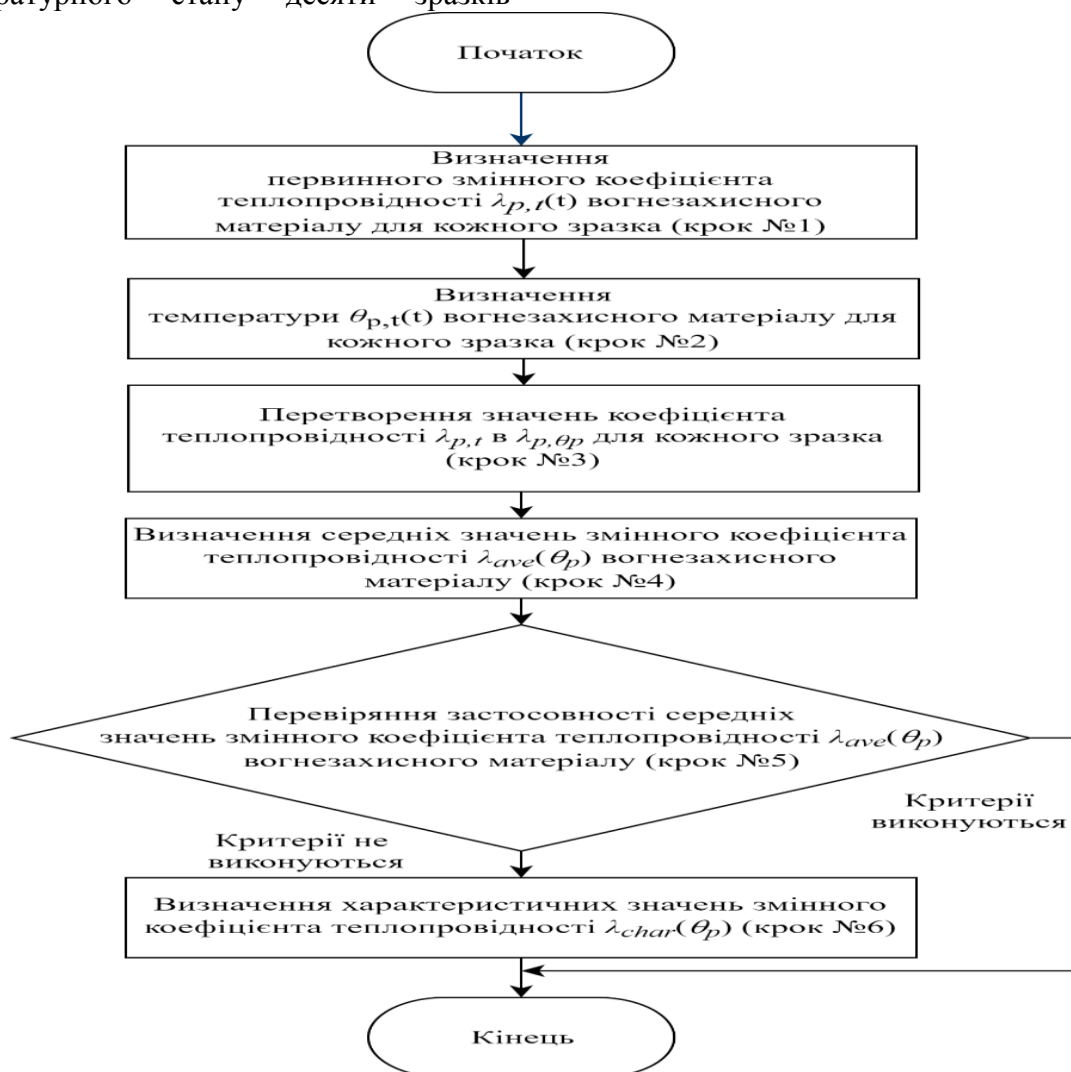


Рисунок 1 – Блок-схема визначення коефіцієнту теплопровідності вогнезахисного матеріалу за методом зі змінним λ_p

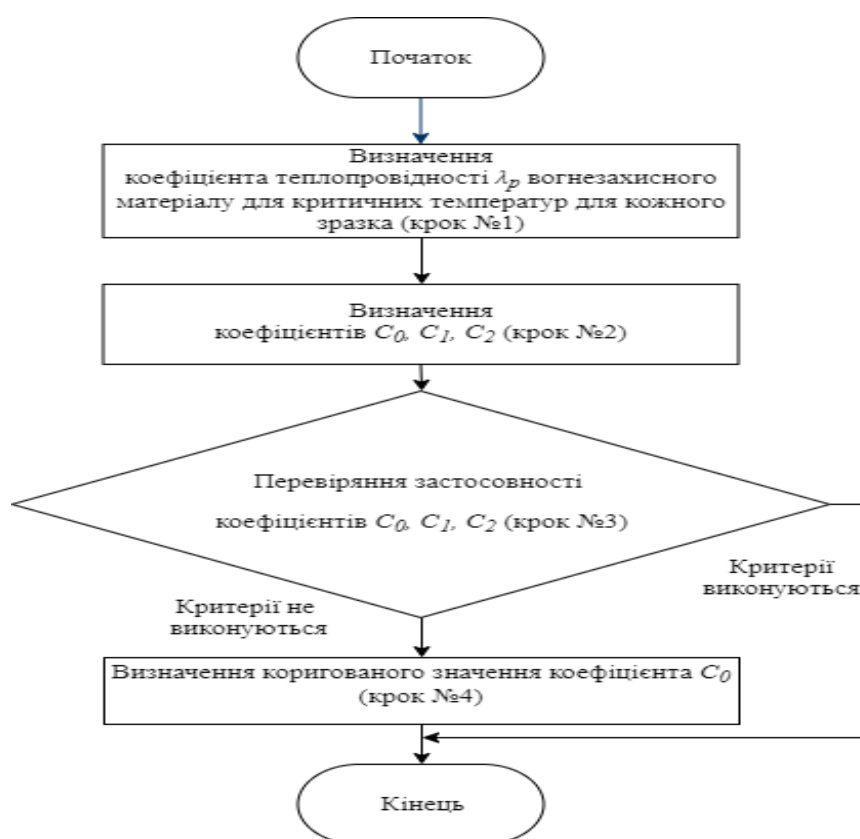


Рисунок 2 – Блок-схема визначення коефіцієнту теплопровідності вогнезахисного матеріалу за методом зі сталим λ_p

При визначенні коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу на першому кроці і перевірці застосовності середніх значень змінного коефіцієнта теплопровідності (рис.1, крок 5) і коефіцієнтів C_0, C_1, C_2 (рис.2, крок 3) використовують базове рівняння теплопровідності [5, 6]. Під час перевіряння застосовності зазначених коефіцієнтів шляхом розв'язання цього рівняння для всіх зразків визначають розрахункові t_{recal} проміжки часу досягнення критичних температур сталі t_{recal} і використовують такі три критерії прийнятності [5, 6]:

- для кожної зразка жодне значення t_{recal} не повинно перевищувати відповідного значення t_{exp} більше ніж на 30 %;
- для кожної зразка середнє значення усіх відсоткових відмінностей t_{recal} від t_{exp} має бути меншим за нуль;
- більшим за нуль мають бути не більше ніж 20 % окремих значень усіх відсоткових відмінностей t_{recal} від t_{exp} .

На третьому етапі валідації проводили визначення розрахункових значень мінімальної товщини $d_{p,cal}$ вогнезахисного матеріалу для різних величин коефіцієнту поперечного перерізу сталеві конструкції, критичної температури сталі і нормованої межі вогнестійкості за процедурою, наведеною в європейських стандартах EN 13381-4:2013 [5] і EN 13381-8:2013 [6].

На наступному етапі шляхом розв'язання прямої задачі теплопровідності визначали дійсні (точні) значення мінімальної товщини $d_{p,ac}$ вогнезахисного матеріалу для тих же параметрів сталеві конструкції, які застосовували на попередньому етапі. Постановка цієї задачі теплопровідності і спосіб її розв'язання такі ж, як і на першому етапі валідації.

На п'ятому етапі за формулою (2) розраховували величини відхилення δ_d між розрахунковими $d_{p,cal}$ і дійсними $d_{p,ac}$ значеннями мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу для різних значень коефіцієнту поперечного перерізу

сталевій конструкції, критичної температури сталі і нормованої межі вогнестійкості $t_{fi,requ}$. За результатами цих розрахунків визначали відповідний діапазон відхилення δ_d , який визначає показники точності європейських розрахункових методів [5, 6].

$$\delta_d = 100(d_{p,cal} - d_{p,ac}) / d_{p,ac}. \quad (2)$$

За результатами розрахунків, проведених для значень коефіцієнту поперечного перерізу сталевій конструкції від 60 м^{-1} до 400 м^{-1} і критичної температури сталі від $350 \text{ }^\circ\text{C}$ до $700 \text{ }^\circ\text{C}$, визначено, що відхилення між розрахунковими і дійсними величинами мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу, отримані за методом зі змінним коефіцієнтом теплопровідності, знаходяться в межах від $-2,6 \%$ до $2,4 \%$, а отримані за методом зі сталим коефіцієнтом теплопровідності – в межах від $-0,3 \%$ до $3,5 \%$.

Одержані величини відхилення δ_d свідчать про прийнятність європейських методів розрахунку мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів, призначених для захисту сталевих конструкцій, для практичного застосування. Ці відхилення суттєво відрізняються від значень δ_d , отриманих для національних розрахункових методів [1], які становлять від 0 до 113% і від 0 до 111% відповідно для методів зі змінним і сталим значенням коефіцієнту теплопровідності вогнезахисного матеріалу [3]. Така значна відмінність у величинах відхилення δ_d викликана застосуванням неоднозначних

процедур визначення коефіцієнту теплопровідності вогнезахисного матеріалу, які наведено в національних розрахункових методах [1].

Висновки та напрями подальших досліджень. Проведеним дослідженням визначено показники точності європейських методів розрахунку мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів, призначених для захисту сталевих конструкцій, які ґрунтуються на розв'язанні рівняння теплопровідності (зі змінним і сталим коефіцієнтом теплопровідності) і наведено в EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013. Встановлено, що діапазони відхилення між розрахунковими і дійсними величинами мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу для європейських методів зі змінним і сталим коефіцієнтом теплопровідності відповідно становлять від $-2,6 \%$ до $2,4 \%$ і від $-0,3 \%$ до $3,5 \%$, що є прийнятним для практичного застосування цих методів.

Встановлено, що має місце значна відмінність між значеннями показників точності європейських і національних (наведених в ДСТУ Б В.1.1-17:2007) методів розрахунку мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів, призначених для захисту сталевих конструкцій. Діапазон відхилення між розрахунковими і дійсними величинами мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу для європейських розрахункових методів значно (у 22,8 рази) менший ніж для національних методів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ Б В.1.1-17:2007. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності (ENV 13381-4:2002, NEQ). Київ: Мінрегіонбуд України, 2007. 66 с.
2. Григорьян Н. Б., Круковский П. Г., Новак С. В. Определение границ применимости и точности стандартизированных методов оценки огнезащитной способности покрытий несущих металлических конструкций. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2014. № 1 (29). С. 50–59.
3. Новак С. В., Новак М. С., Бедратюк О. І. Особливості оцінювання методів визначення характеристик вогнестійкості будівельних конструкцій. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. № 2 (8). С. 29–40.

4. ENV 13381-4:2002. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 4: Applied protection to steel members. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2003 CEN. 76 p.
5. EN 13381-4:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 4: Applied passive protection to steel members. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 83 p.
6. EN 13381-8:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 8: Applied reactive protection to steel members. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 80 p.
7. Круковский П. Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход) : монографія. Київ : Інститут технічної теплофізики НАН України, 1996. 218 с.

REFERENCES

1. DSTU B V.1.1-17:2007. *Vohnezhakhysni pokryttia dlia budivelnnykh nesuchykh metalevykh konstruksii. Metod vyznachennia vohnezhakhysnoi zdatnosti [Fire-retardant coatings for building load-bearing metal structures. Method for determining the fire retardant ability]* (ENV 13381-4:2002, NEQ). Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2007. 66 s. [in Ukrainian].
2. Grigoryan, N. B., Krukovskyi, P. G., Novak, S. V. *Opredeleniye granits primenimosti i tochnosti standartizirovannykh metodov otsenki ognezashchitnoy sposobnosti pokrytiy nesushchikh metallicheskiikh [Determination of boundaries of the applicability and accuracy of the standardized assessment methods for fire protection ability of coatings to carrying metal structures]*. Naukovyi visnyk UkrNDIPB. 2014. # 1 (29). S. 50–59 [in Russian].
3. Novak, S. V., Novak, M. S., Bedryuk O. I. *Osoblyvosti otsiniuvannia metodiv vyznachennia kharakterystyk vohnestiikosti budivelnnykh konstruksii [Determination of boundaries of the applicability and accuracy of the standardized assessment methods for fire protection ability of coatings to carrying metal structures]*. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2019. # 2 (8). S. 29–40 [in Ukrainian].
4. ENV 13381-4:2002. *Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 4: Applied protection to steel members*. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2003 CEN. 76 p.
5. EN 13381-4:2013. *Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 4: Applied passive protection to steel members*. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 83 p.
6. EN 13381-8:2013. *Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 8: Applied reactive protection to steel members*. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 80 p.
7. Krukovskyi, P.G. *Obratnyye zadachi teplomassoperenosa (obshchiy inzhenernyy podkhod) : monohrafiia*. Kyiv : Instytut tekhnichnoi teplofizyky NAN Ukrainy. 1996. 218 s. [in Russian].

VALIDATION OF METHODS OF CALCULATION OF MINIMUM THICKNESS OF FIRE-PROTECTIVE MATERIALS FOR STEEL STRUCTURES

S. Novak¹, M. Novak²

¹*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection*

²*National Technical University of Ukraine, Kyiv Polytechnic Institute*

KEYWORDS	ANNOTATION
validation, fire-protective material, fire resistance, minimum material thickness, accuracy indicators, calculation method, steel structure	Given the importance of the reliability of data on fire-retardant ability of fire-protective materials in determining the design parameters of fire-retardant objects, research is relevant to further improve and develop methods for assessing the quality of these materials, including the accuracy of the results. The article presents the results of the study of the convergence of accuracy of European and national methods for calculating the minimum thickness of fire-protective materials designed to protect steel structures based on solving the equation of thermal conductivity (with variable and constant thermal conductivity of fire-protective material). During this study, a validation procedure based on the application of the computational experiment method was used to determine the accuracy of European calculation methods. This procedure determines the accuracy of European calculation methods, which are based on the solution of the thermal equation and is given in EN 13381-4:2013 and EN 13381-8:2013. Block diagrams and software using the Python 3.7 programming language with the JetBrains PyCharm integrated development environment were developed for the software implementation of the validation procedure. According to the results of the validation it is established that the deviation ranges between the calculated and actual values of the minimum thickness of the fire-protective material for European methods with variable and constant thermal conductivity are from -2.6 % to 2.4 % and from -0.3 % to 3.5 %, which is acceptable for the practical application of these methods. It is established that there is a significant difference between the values of the accuracy of European and national calculation methods, which are given in DSTU B V.1.1-17:2007. The range of deviation between the calculated and actual values of the minimum thickness of the fire-protective material for European calculation methods is significantly (22.8 times) smaller than for national methods.

ВАЛИДАЦИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА МИНИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ОГНЕЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С. Новак¹, М. Новак²

¹*Институт государственного управления и научных исследований по гражданской защите,*

²*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА	АННОТАЦИЯ
валидация, огнезащитный материал, огнестойкость, минимальная толщина, показатели точности, расчетный метод, стальная конструкция	Актуальными являются исследования, направленные на развитие методов оценки показателей качества этих материалов, в том числе в части показателей точности получаемых результатов. Приведены результаты исследования сходимости показателей точности европейских и национальных методов расчета минимальной толщины огнезащитных материалов, предназначенных для защиты стальных конструкций, основанных на решении уравнения теплопроводности (с переменным и постоянным коэффициентом теплопроводности огнезащитного материала). Во время этого исследования для определения показателей точности европейских расчетных методов использовали процедуру валидации, основанную на применении метода вычислительного эксперимента. По этой процедуре определены показатели точности европейских методов, которые приведены в EN 13381-4: 2013 и EN 13381-8: 2013. Определено, что диапазоны отклонения между расчетными и действительными величинами минимальной толщины огнезащитного материала для европейских методов с переменным и постоянным коэффициентом теплопроводности соответственно составляют от -2,6 % до 2,4 % и от -0,3 % до 3,5 %. Определено, что имеет место значительная разница между значениями показателей точности европейских и национальных расчетных методов, которые приведены в ДСТУ Б В.1.1-17: 2007. Диапазон отклонения между расчетными и действительными величинами минимальной толщины огнезащитного материала для европейских расчетных методов значительно (в 22,8 раза) меньше, чем для национальных методов.