



*Р. М. Тацій, О. В. Лазаренко, А. М. Кастраниць, М. І. Тацій, С. С. Сергєєв*  
 Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7764-2528> – Р. М. Тацій

<https://orcid.org/0000-0003-0500-0598> – О. В. Лазаренко

<https://orcid.org/0009-0008-3679-9535> – А. М. Кастраниць

<https://orcid.org/0009-0005-0601-8775> – М. І. Тацій

<https://orcid.org/0009-0005-3311-9192> – С. С. Сергєєв



[r.tatsiy@ldubgd.edu.ua](mailto:r.tatsiy@ldubgd.edu.ua)

## МЕТОД РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ ЗА УМОВИ ВУГЛЕВОДНЕВОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ

**Вступ.** Оцінка використання різноманітних покриттів для підвищення ступеня вогнестійкості будівельних конструкцій є актуальною практичною задачею. В умовах воєнного стану та обстрілів інфраструктурних об'єктів населених пунктів врахування вуглеводневого режиму розвитку пожежі для всіх типів об'єктів є необхідним, оскільки типово враховують лише звичайні умови розвитку пожежі.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є розробка альтернативної методики оцінки (розрахунку) ефективності застосування вогнезахисного покриття для вогнезахисту металевих конструкцій за умови впливу вуглеводневого температурного режиму пожежі. Для вирішення поставленої мети було необхідно провести оцінку існуючих методик та здійснити математичне моделювання з розв'язком задачі теплопровідності, яка б враховувала різні температурні режими пожежі.

**Методи.** В роботі аналітично-порівняльними методами оцінено існуючі методики визначення вогнезахисної ефективності покриттів з подальшим математичним моделюванням і вирішенням задачі теплопровідності.

**Результати.** За результатом розв'язку нестационарної задачі теплопровідності з використанням крайових умов третього роду. В основі розв'язку цієї задачі використано метод редукції, концепція квазіпохідних, метод власних функцій та метод розвинення в ряди Фур'є. Разом з тим запропонована модель дає можливість здійснювати зміну зведеної товщини металеві конструкції, вогнезахисного покриття та температурний режим пожежі.

**Висновки.** Результати розрахунку показали, що якщо товщина вогнезахисного покриття на сталевій балці становить 1,6 та 2,5 мм, то максимальна температура прогріву протягом 90 хв становитиме 189,8 та 159,35 °C відповідно. За аналогічний часовий проміжок максимальна температура в 110,85 °C буде спостерігатися на металевій фермі з товщиною вогнезахисного покриття 2,5 мм та 140,97 °C – на сталевих щитах з покриттям товщиною 4,0 мм.

**Ключові слова:** вогнезахисне покриття, вогневий вплив, вогнезахисна здатність, математична модель, задача теплопровідності, сталева конструкція, температурний режим вуглеводневої пожежі

*R. M. Tatsii, O. V. Lazarenko, A. M. Kastranets, M. I. Tatsii, S. S. Serhieiev*  
 Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

## METHOD FOR CALCULATING THE EFFECTIVENESS OF FIRE-PROTECTIVE COATING APPLICATION UNDER HYDROCARBON FIRE TEMPERATURE CONDITIONS

**Introduction.** The assessment of the use of various coatings to increase the fire resistance rating of building structures is an urgent practical task. Under martial law and shelling of infrastructure facilities in populated areas, consideration of the hydrocarbon fire development regime for all types of facilities is necessary, since typically only standard fire development conditions are taken into account.

**Objective and research tasks.** The aim of this study is to develop an alternative methodology for assessing (calculating) the effectiveness of the application of fire-protective coating for the fire protection of metal structures under the influence of the hydrocarbon fire temperature regime. To achieve this objective, it was necessary to evaluate existing

methodologies and to perform mathematical modeling with the solution of the heat conduction problem, which would take into account different fire temperature regimes.

**Methods.** In this study, existing methodologies for determining the fire-protective effectiveness of coatings were evaluated using analytical and comparative methods, followed by mathematical modeling and the solution of the heat conduction problem.

**Results.** Based on the solution of the non-stationary heat conduction problem using third-kind boundary conditions, the study was carried out. The solution of this problem is based on the reduction method, the quasi-derivative concept, the eigenfunction method, and the Fourier series expansion method. At the same time, the proposed model makes it possible to vary the reduced thickness of the metal structure, the fire-protective coating, and the fire temperature regime.

**Conclusions.** The calculation results showed that if the thickness of the fire-protective coating on a steel beam is 1.6 and 2.5 mm, the maximum heating temperature over 90 minutes will be 189.8 and 159.35°C, respectively. Over the same time interval, a maximum temperature of 110.85°C will be observed on a metal truss with a fire-protective coating thickness of 2.5 mm, and 140.97°C on steel panels with a coating thickness of 4.0 mm.

**Keywords:** fire-protective coating, fire exposure, fire-protective performance, mathematical model, heat conduction problem, steel structure, hydrocarbon fire temperature regime.

**Вступ.** Для захисту будівельних конструкцій та опорних і несучих елементів будівлі від теплової дії полум'я під час пожежі використовуються різноманітні інженерно-технічні рішення. Одним з найпоширеніших видів захисту, зокрема для металевих конструкцій, є використання вогнезахисних покриттів, які збільшують межу вогнестійкості відповідної конструкції до нормованого значення [1]. Загалом, відповідно до основних нормативних документів та практичних посібників з проектування [2-5], розрізняють такі основні види температурних режимів пожежі: зовнішній, стандартний, параметричний, вуглеводневий та водневий.

В сучасних обставинах воєнного стану та постійних обстрілів об'єктів критичної інфраструктури України відбувається нетиповий сценарій розвитку пожежі та температурних режимів, внаслідок імовірного потраплення в приміщення ракетного палива вибухових речовин тощо. Відповідно, стандартний температурний режим розвитку пожежі може бути заміщений в більшості випадків, більш агресивними, такими як водневий та вуглеводневий. Якщо горіння водню – це досить специфічний випадок, актуальний в більшості випадків для таких об'єктів як атомні електростанції, то вуглеводневий режим розвитку пожежі більш актуальний та розповсюджений.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Оцінка ефективності застосування вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій в умовах вуглеводневого температурного режиму є актуальною теплотехнічною та практичною задачею, яка дозволяє практично оцінити час ефективного захисту металевої конструкції.

Низка наукових досліджень спрямована на те, щоб якісно та кількісно оцінити ефективність захисту металевих конструкцій. Нормативні документи та стандарти [2-5] дають загальну

методику оцінювання визначення вогнестійкості металевих конструкцій відповідно до визначеного режиму пожежі, які також передбачають такі методи: розрахунок вогнестійкості за табличними даними; спрощені методи розрахунку; уточнені методи розрахунку; випробування. Однак, відповідні стандарти не регламентують та чітко не визначають ступінь захисту конструкції залежно від виду та типу вогнезахисного покриття.

В роботі [6] автори навели результати своїх аналітичних досліджень з наступним математичним моделюванням досягнення критичних показників для незахищених металевих конструкцій у різних температурних режимах пожежі. Відповідно, встановлено, що настання критичної температури 500 °C за режиму вуглеводневої пожежі становитиме близько 450 с.

Автори роботи [7] визначили детальний розподіл температури по сталевій балці за умови параметричного режиму пожежі. Встановлено, що максимальна температура за умови стандартного режиму пожежі досягає 943,09°C, що на 18,3% перевищує відповідний показник для параметричної пожежі (770°C).

Враховуючи вимоги стандартів та сучасні тенденції розвитку значна частина досліджень зосереджена на встановленні критичних показників вогнезахисних покриттів та подальшого визначення їх вогнезахисної ефективності. Зокрема, автори роботи [8] провели дослідження щодо збіжності показників точності європейських і національних методів розрахунку мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів, призначених для захисту сталевих конструкцій.

В дослідженні [9] з'ясовано різницю між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, і значеннями цієї товщини, так і для умов

вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі. Діапазон значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для умов вогневого впливу з температурного режиму вуглеводневої пожежі становить від 0,21мм до 45 мм і він є ширшим, ніж для температурного режиму зовнішньої пожежі, для якого ці значення змінюються в діапазоні від 0,06 мм до 349 мм.

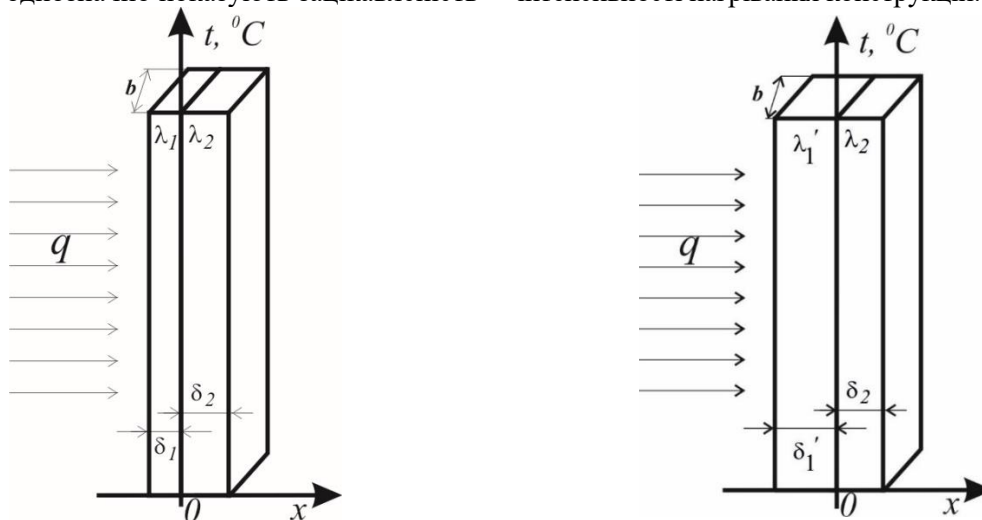
Окремо можна виділити дослідження [10, 11] результати якого спрямовані на встановлення вогнезахисної здатності відповідного покриття та представлення відповідної методики оцінки його ефективності. В роботах представлено відповідні результати мінімальної товщини покриття за умови дії температурного режиму впродовж 30 хв. Однак, як стверджує [5], відповідні результати досліджень актуальні та корелюються лише для відповідного експериментального металевго взірця та відповідного вогнезахисного покриття.

Наведені вище результати наукових досліджень однозначно показують зацікавленість

наукової спільноти в напрямку покращення та вдосконалення методики оцінки, розрахунку та встановлення параметрів металевих конструкцій та вогнезахисних покриттів. Таким чином, **метою цього дослідження** є розробка альтернативної методики оцінки (розрахунку) ефективності застосування вогнезахисного покриття для вогнезахисту металевих конструкцій за умови впливу вуглеводневого температурного режиму пожежі.

**Виклад основного матеріалу.** Для дослідження розподілу температурного поля по товщині сталеві конструкції, захищеної вогнезахисним покриттям, змодельємо її у вигляді двошарової конструкції з відповідною товщиною вогнезахисного покриття (рис.1).

На конструкцію діє тепловий потік факела полум'я. Відомо, що при інтенсивному нагріванні вогнезахисне покриття спучується внаслідок чого його теплофізичні характеристики і геометричні розміри змінюються, що призводить до зменшення інтенсивності нагрівання конструкцій.



а) до спучення вогнезахисної фарби

б) після спучення вогнезахисної фарби

**Рисунок 1** – Схематичне зображення конструкції з вогнезахистом:

$\delta_1$  – вогнезахисне покриття до та після спучення;  $\delta_2$  – металева конструкція;  $q$  – тепловий потік Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda_1$  – теплопровідність вогнезахисного покриття, Вт/(м·°C);  $\lambda_2$  – теплопровідність сталі; Вт/(м·°C)

Для дослідження розподілу нестационарного температурного поля по товщині двошарової конструкції використаємо диференціальне рівняння теплопровідності (1):

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right), \tau > 0, \quad (1)$$

де  $x$  – координата, м;  $\tau$  – час, с;  $c$  – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·°C);  $\rho$  – густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>, з крайовими умовами третього роду:

$$\begin{cases} \alpha_0 t(0, \tau) - \lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_0 \psi_0(\tau), \\ \alpha_n t(x_n, \tau) - \lambda \frac{\partial t(x_n, \tau)}{\partial x} = \alpha_n \psi_n(\tau), \end{cases} \quad (2)$$

де  $\alpha_0, \alpha_n$  – коефіцієнти теплообміну на обігріваній та необігріваній поверхнях, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\psi_0, \psi_n$  – закони зміни температури на обігріваній та необігріваній поверхнях, та початковою умовою:

$$t(x, 0) = t_0 = 20^\circ\text{C}. \quad (3)$$

Розв'язок задачі (1)-(3) шукаємо у вигляді суми двох функцій (метод редукції)

$$t(x, \tau) = u(x, \tau) + v(x, \tau), \quad (4)$$

де:  $t(x, \tau)$  – функція температури, °С.

Будь-яку з функцій  $u(x, \tau)$  або  $v(x, \tau)$  можна вибрати довільним чином, тоді інша визначатиметься однозначно.

Виберемо функцію  $u(x, \tau)$  як розв'язок квазістаціонарної задачі

$$(\lambda u')' = 0 \quad (5)$$

з крайовими умовами

$$\begin{cases} \alpha_0 u(0, \tau) - u^{[1]}(0, \tau) = \alpha_0 \psi_0(\tau), \\ \alpha_n u(x_n, \tau) + u^{[1]}(x_n, \tau) = \alpha_n \psi_n(\tau). \end{cases} \quad (6)$$

де  $u^{[1]} = \lambda \frac{\partial u}{\partial \tau}$  – квазіпохідна.

Розв'язок квазістаціонарної крайової задачі (5)-(6) має вигляд

$$u(x, \tau) = (1 \ 0) \cdot U(x, \tau) = (1 \ 0) \cdot B_0(x, 0) \times P_0(\tau), \quad (7)$$

де позначено

$$P_0(\tau) = (P + Q \cdot B(x_n, 0))^{-1} \cdot \Gamma(\tau),$$

$$P = \begin{pmatrix} \alpha_0 & -1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \alpha_n & 1 \end{pmatrix},$$

$$\Gamma(\tau) = \begin{pmatrix} \alpha_0 \psi_0(\tau) \\ \alpha_n \psi_n(\tau) \end{pmatrix}, \quad B_0(x, 0) = \begin{pmatrix} 1 & \frac{x-0}{\lambda_0} \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$B(x_n, 0) = \begin{pmatrix} 1 & \sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_{i+1} - x_i}{\lambda_i} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Використовуючи (4) перепишемо рівняння (1) у такому вигляді

$$c\rho \frac{\partial u}{\partial \tau} + c\rho \frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (8)$$

Враховуючи, що  $u(x, \tau)$  є розв'язком задачі (5)-(6), рівняння (8) набуде вигляду

$$c\rho \frac{\partial u}{\partial \tau} + c\rho \frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (9)$$

Тут слід зауважити, що функцію  $c\rho \frac{\partial u}{\partial \tau}$  вважатимемо відомою, оскільки відома функція  $u(x, \tau)$ .

Оскільки функція  $u(x, \tau)$  справджує крайові умови (2), то із зображення (4) випливають умови для функції  $v(x, \tau)$

$$\begin{cases} \alpha_0 v(0, \tau) - v^{[1]}(0, \tau) = 0, \\ \alpha_n v(x_n, \tau) + v^{[1]}(x_n, \tau) = 0, \end{cases} \quad (10)$$

а початкова умова набуває вигляду

$$v(x, 0) = f(x) \equiv t_0 - u(x, 0). \quad (11)$$

Цей розв'язок можна побудувати таким чином:

1. Характеристичне рівняння задачі на власні значення має вигляд

$$\Phi(\omega) = \det(P + Q \cdot B(x_n, 0, \omega)) =$$

$$= \det \left( \begin{pmatrix} \alpha_0 & -1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \alpha_n & 1 \end{pmatrix} \times \prod_{i=0}^{n-1} \begin{pmatrix} \cos \sqrt{\frac{c_i \rho_i \omega}{\lambda_i}} (x_{i+1} - x_i) & \frac{\sin \sqrt{\frac{c_i \rho_i \omega}{\lambda_i}} (x_{i+1} - x_i)}{\lambda_i \sqrt{\frac{c_i \rho_i \omega}{\lambda_i}}} \\ -\lambda_i \sqrt{\frac{c_i \rho_i \omega}{\lambda_i}} \sin \sqrt{\frac{c_i \rho_i \omega}{\lambda_i}} (x_{i+1} - x_i) & \cos \sqrt{\frac{c_i \rho_i \omega}{\lambda_i}} (x_{i+1} - x_i) \end{pmatrix} \right) = 0. \quad (12)$$

З рівності знаходимо власні значення  $\omega_k$ .

2. Власні функції  $X_k(x, \omega_k)$ , які відповідають відповідним власним значенням  $\omega_k$ , мають таку структуру:

$$X_k(x, \omega_k) = (1 \ 0) \cdot \begin{pmatrix} \cos \beta_k(x-0) & \frac{\sin \beta_k(x-0)}{\lambda \beta_k} \\ -\lambda \beta_k \sin \beta_k(x-0) & \cos \beta_k(x-0) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ \alpha_0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

де позначено  $\beta_k = \sqrt{\frac{c_i \rho_i \omega_k}{\lambda_i}}$ .

3. Квадрат норми  $\|X_k\|^2$  власних функцій  $X_k(x, \omega_k)$  має вигляд

$$\|X_k\|^2 = c\rho \cdot \int_0^{x_n} X_k^2(x, \omega_k) dx. \quad (14)$$

4. Коефіцієнти Фур'є розвинення початкової умови  $f(x)$

$$f_k = \frac{1}{\|X_k\|^2} c\rho \int_0^{x_n} f(x) X_k(x, \omega_k) dx. \quad (15)$$

5. Коефіцієнти Фур'є розвинення функції  $\frac{\partial u(x, \tau)}{\partial \tau}$

$$u_k(s) = \frac{1}{\|X_k\|^2} c \rho \int_0^{x_k} \frac{\partial u(x, s)}{\partial s} X_k(x, \omega_k) dx. \quad (16)$$

Використовуючи формули (13)-(16), розв'язок мішаної задачі (9)-(11) будемо у вигляді ряду:

$$v(x, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[ f_k \cdot e^{-\omega_k \tau} - \int_0^{\tau} e^{-\omega_k(\tau-s)} u_k(s) ds \right] \cdot X_k(x, \omega_k). \quad (17)$$

Використовуючи зображення та з урахуванням формул (7), остаточно отримуємо розв'язок задачі у вигляді

$$t(x, \tau) = (1 \ 0) \cdot B_0(x, 0) \cdot P_0(\tau) + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ f_k e^{-\omega_k \tau} - \int_0^{\tau} e^{-\omega_k(\tau-s)} u_k(s) ds \right] X_k(x, \omega_k). \quad (18)$$

З розв'язками задач (12) та (18) детально можна ознайомитись у роботах [12, 13].

Одержаний вираз (18) дає можливість дослідити вогнестійкість конструкцій, захищених вогнезахисним покриттям, враховуючи зміну теплофізичних характеристик та геометричних розмірів, оцінити ефективність вогнезахисної фарби, нанесеної на конструктивні елементи. Для оптимізації розрахунків вищезазначений розв'язок прописано у вигляді алгоритму в

системі комп'ютерної алгебри Maple 13. При обчисленні практичної задачі кількість членів ряду є обмеженою (становить 50) для розв'язку з точністю до двох знаків після коми.

Для розв'язку рівняння теплопровідності потрібно задати температурні залежності теплофізичних характеристик металевих конструкцій. В табл. 1 подані теплофізичні характеристики матеріалів, необхідних для здійснення розрахунку.

**Таблиця 1**

Теплофізичні характеристики матеріалів сталі

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(t)$ , Вт/(м·°С)	Питома масова теплоємність, $c$ , Дж/(кг·°С)	Густина, $\rho$ кг/м <sup>3</sup>
54 – 3,33·10 <sup>-2</sup> t при 20 °С ≤ t ≤ 800 °С, 27,3 при t > 800 °С.	425+0,773t / 1,69 10 <sup>-2</sup> t <sup>2</sup> +2,22 10 <sup>-6</sup> t <sup>3</sup> при 20 °С ≤ t ≤ 600 °С, 666–13002/(t -738) при 600°С < t ≤ 735°С, 545+17820/(t -731) при 735°С < t ≤ 900°С, 650 при 900°С < t ≤ 1200°С	7850

Для проведення теплотехнічного розрахунку було використано коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного покриття відповідно до даних сертифікаційних випробувань, що є необхідною умовою для всіх вогнезахисних засобів.

Для математичного моделювання було обрано чотири типи металевих конструкцій з такими вихідними умовами:

1. Сталева балка Б1 має тристоронній обігрів (справа, зліва, знизу). Тип пожежі – вуглеводневий. Необхідний клас вогнестійкості – R90. Зведена товщина металу для балки Б1 – 20,83 мм. Товщина вогнезахисної фарби – 1,6 мм.

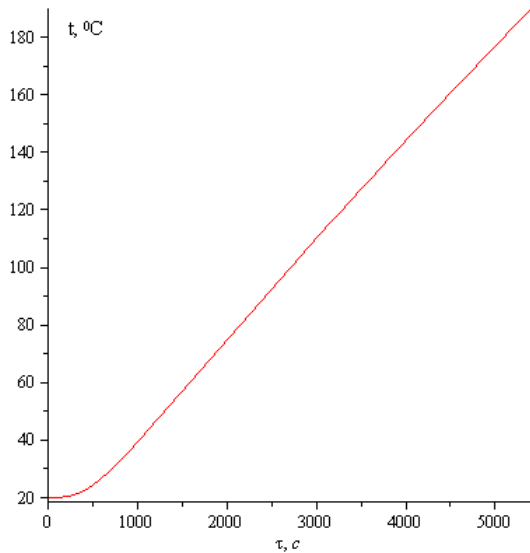
2. Сталева балка Б2 має тристоронній обігрів (справа, зліва, знизу). Тип пожежі – вуглеводневий. Необхідний клас вогнестійкості – R90. Зведена товщина металу для балки Б2 – 13,98 мм. Товщина вогнезахисної фарби – 2,5 мм.

3. Сталева ферма Ф1 має тристоронній обігрів (справа, зліва, знизу). Тип пожежі –

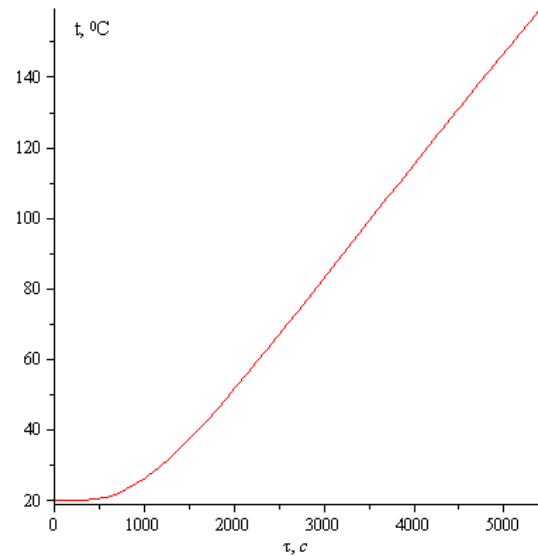
вуглеводневий. Необхідний клас вогнестійкості – R90. Зведена товщина металу для ферми Ф1 – 10,24 мм. Товщина вогнезахисної фарби – 2,5 мм.

4. Сталеві щити Щ1-Щ3 мають тристоронній обігрів (справа, зліва, знизу). Тип пожежі – вуглеводневий. Необхідний клас вогнестійкості – R90. Зведена товщина металу для щитів Щ1-Щ3 – 5,44 мм. Товщина вогнезахисної фарби – 4,0 мм.

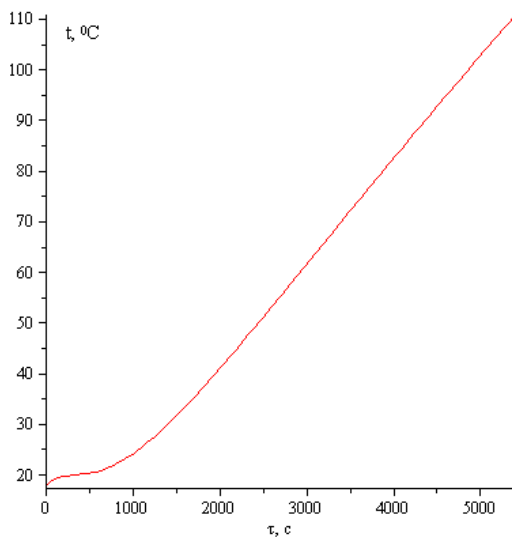
**Результати теплотехнічного розрахунку.** Використовуючи програмне забезпечення Maple 13 за формулою (18) ми провели розрахунки розподілу температурного поля по товщині конструкцій, захищених вогнезахисним покриттям, що спучується. Результати розрахунків впливу вуглеводневого температурного режиму пожежі на конструкцію, захищену вогнезахисним покриттям для металевих конструкцій, зображені графічно на рис.2.



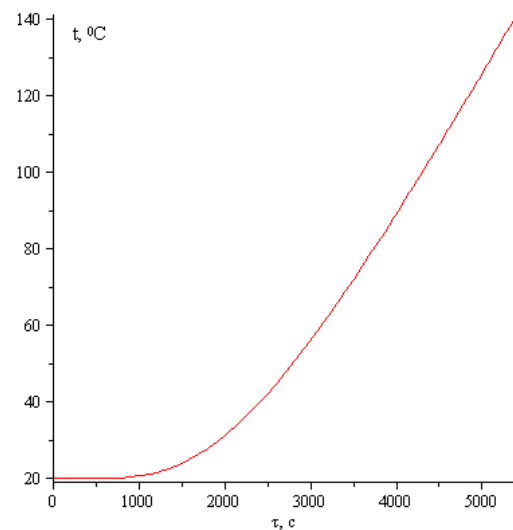
а) Розподіл температурного поля балки Б1, захищеної вогнезахисним покриттям товщиною 1,6 мм



б) Розподіл температурного поля по товщині балки Б2, захищених вогнезахисним покриттям товщиною 2,5 мм



в) Розподіл температурного поля по товщині балки Ф1, захищеної вогнезахисним покриттям товщиною 2,5 мм



г) Розподіл температурного поля по товщині щитів Щ1-Щ3, захищеної вогнезахисним покриттям товщиною 4,0 мм

**Рисунок 2** – Розподіл температурного поля по товщині різних металевих конструкцій з використанням запропонованого розрахунку

Результати проведеного розрахунку (рис.2) дають чітке розуміння, що:

-розрахунок впливу вуглеводневого температурного режиму пожежі на нагрівання конструкції сталеві балки Б1, захищеної вогнезахисним покриттям, (рис. 2 а) показує, що за 5400 с (90 хв) балка прогріється до температури 189,8 °С, що є меншим за критичну температуру для сталі (500 °С). Таким чином, клас вогнестійкості R90 для балки Б1 з нанесеним вогнезахисним покриттям товщиною 1,6 мм забезпечений.

-розрахунок впливу вуглеводневого температурного режиму пожежі на нагрівання конструкції сталеві балки Б2, захищеної вогнезахисним покриттям, показує, що за 5400 с (90 хв) балка прогріється до температури 159,35 °С, що є меншим за критичну температуру для сталі (500 °С). Таким чином, клас вогнестійкості R90 для балки Б2 з нанесеним вогнезахисним покриттям товщиною 2,5 мм забезпечений.

-розрахунок впливу вуглеводневого температурного режиму пожежі на нагрівання конструкції сталеві ферми Ф1, захищеної

вогнезахисним покриттям, показує, що за 5400 с (90 хв) ферма прогріється до температури 110,85 °С, що є меншим за критичну температуру для сталі (500 °С). Таким чином, клас вогнестійкості R90 для ферми Ф1 з нанесеним вогнезахисним покриттям товщиною 2,5 мм забезпечений.

-розрахунок впливу вуглеводневого температурного режиму пожежі на нагрівання конструкції сталевих щитів Щ1-Щ3, захищених вогнезахисним покриттям, показує, що за 5400 с (90 хв) щити прогріються до температури 140,97 °С, що є меншим за критичну температуру для сталі (500 °С). Таким чином, клас вогнестійкості R90 для ферми сталевих щитів Щ1-Щ3 з нанесеним вогнезахисним покриттям товщиною 4,0 мм забезпечений.

**Висновки.** Наведена методика розрахунку дає можливість здійснити оцінку вогнезахисного покриття з визначеними теплофізичними характеристиками за умови дії вуглеводневого температурного режиму пожежі для різних типів металевих конструкцій. Разом з тим запропонована математична модель враховує товщину вогнезахисного покриття, що дає можливість встановити оптимальну його товщину відповідно до визначених потреб.

Результати розрахунку показали, що за умови товщини вогнезахисного покриття 1,6 та 2,5 мм на сталевій балці максимальна температура прогріву протягом 90 хв. становитиме 189,8 та 159,35 °С відповідно.

#### Список літератури:

1. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. На заміну ДБН В.1.1-7-2002; чинний від 01.06.2017. М. Київ : Український науково-дослідний інститут цивільного захисту УкрНДІЦЗ, 2016. 25 с.
2. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі. Зміна № 1 (EN 1991-1-2:2002, IDT+EN 1991-1-2:2002/AC:2013, IDT+NA:2013). Чинний від 01.07.2014. М. Київ: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2014. 25 с.
3. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT). Зі змінами. Чинний від 01.07.2013. М. Київ : ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2010. 25 с.
4. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Чинний від 01.04.2017. Київ : ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК), 2016. 45 с.

5. Розрахунок сталевих конструкцій на вогнестійкість відповідно до Єврокоду 3. Практичний посібник до ДСТУ-Н EN 1993-1-2:2010 / К. Калафат та ін.; Асоціація «Український центр сталевих будівництва». Київ: Український Центр Сталевих Будівництва, 2016. 81 с.

6. Вплив температурних режимів пожеж на вогнестійкість будівельних конструкцій / О. Башинський та ін. *Пожежна безпека*. Львів, 2017. № 31. С. 6–10.

7. Залежність впливу параметричної пожежі на розподіл температури по сталевій балці: залежність впливу параметричної пожежі на розподіл температури по сталевій балці. / С. Сідней та ін. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Черкаси, 2025. Т. 2, №. 20. С. 40–46. URL:

[https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2\(20\).40-46](https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2(20).40-46).

8. Новак С., Новак М. Валідація методів розрахунку мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів для сталевих конструкцій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Черкаси, 2022. Т. 2, вип. 10. С. 83–90. URL:

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.2.83-90>.

9. Новак С., Добростан О., Пустовий М. Вплив температурного режиму пожежі на необхідну мінімальну товщину вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Черкаси, 2022. Т. 2, вип. 14. С. 5–20. URL:

[https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2\(14\).5-20](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2(14).5-20).

10. Ковальов А. І., Зобенко Н. В. Методика попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Харків, 2016. Т. 1, вип. 1. С. 59–65.

11. Експериментальне дослідження вогнезахисної здатності покриття «Amotherm Steel Wb» при температурному режимові вуглеводневої пожежі / А. Ковальов та ін. *Пожежна безпека: теорія і практика*. Черкаси, 2014. № 17. С. 53–60.

12. Tatsii R. M., Pazen O. Y. Direct (classical) method of calculation of the temperature field in a hollow multilayer cylinder. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018. №. 91. С. 1373–1384. URL:

<https://doi.org/10.1007/s10891-018-1871-3>

13. Тацій Р., Пазен О., Шипот Л. Дослідження температурного поля в системі багатошарових циліндричних твердих тіл за умов пожежі. *Пожежна безпека*. Львів, 2020. №37. С. 64–71. URL:

<https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.10>

## References:

1. DBN V.1.1-7:2016. Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy [Design of steel structures. Calculation of structures for fire resistance.] (2016). Kyiv: State Research Institute of Building Structures (SRIBS) [in Ukrainian].
2. DSTU-N B EN 1991-1-2:2010. Yevrokod 1. Dii na konstruktsii. Chastyna 1-2. Zahalni dii. Dii na konstruktsii pid chas pozhezhi. Zmina № 1 [Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-2. General actions. Actions on structures during fire. Amendment No. 1] (EN 1991-1-2:2002, IDT+EN 1991-1-2:2002/AC:2013, IDT+NA:2013). (2014). Kyiv: State Research Institute of Building Structures (NRIBK) [in Ukrainian].
3. DSTU-N B EN 1993-1-2:2010. Yevrokod 3. Proektuvannia stalevykh konstruktsii. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennia. [Rozrakhunok konstruktsii na vohnestiikist Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-2. General provisions. Fire resistance calculation of structures (EN 1993-1-2:2005, IDT)]. With Amendments. (2010). Kyiv: State Enterprise "State Research Institute of Building Structures" (SRIBS) [in Ukrainian].
4. DSTU-N B V.2.6-211:2016. Proektuvannia stalevykh konstruktsii. Rozrakhunok konstruktsii na vohnestiikist. [Fire safety of construction sites. General requirements.] (2016). Kyiv: Ukrainian Research Institute of Civil Protection UkrNIITZZ [in Ukrainian].
5. Kalafat, K., et al. (2016). Rozrakhunok stalevykh konstruktsii na vohnestiikist vidpovidno do Yevrokodu 3. [Calculation of steel structures for fire resistance according to Eurocode 3. Practical guide to DSTU-N EN 1993-1-2:2010.] Kyiv: Ukrainian Center for Steel Construction.
6. Bashynskiy, O., et al. (2017). Vplyv temperaturnykh rezhymiv pozhezhi na vohnestiikist budivnykh konstruktsii [The influence of temperature regimes of fires on the fire resistance of building structures]. *Fire Safety*, 31, 6–10.
7. Sidney, S., et al. (2025). Zalezhnist vplyvu parametrychnoi pozhezhi na rozpodil temperatury po stalevii baltsi [Dependence of the influence of a parametric fire on the temperature distribution along a steel beam] *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 2(10), 40–46. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2\(20\).40-46](https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2(20).40-46)
8. Novak, S., & Novak, M. (2022). Validatsiia metodiv rozrakhunku minimalnoi tovshchyny vohnezakhysnykh materialiv dlia stalevykh konstruktsii [Validation of methods for calculating the minimum thickness of fire-retardant materials for steel structures]. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 2(10), 83–90. Retrieved from <https://doi.org/10.33269/nvcz.2020.2.83-90>
9. Novak, S., Dobrostan, O., & Pustovy, M. (2022). Vplyv temperaturnoho rezhymu pozhezhi na neobkhidnu minimalnu tovshchynu vohnezakhysnykh pokryttiv dlia stalevykh konstruktsii [The influence of the temperature regime of fire on the required minimum thickness of fire-retardant coatings for steel structures.] *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 2(14), 5–20. Retrieved from [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2\(14\).5-20](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2(14).5-20)
10. Kovalev, A. I., & Zobenko, N. V. (2016). Metodyka poperednoi otsinky vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttiv dlia stalevykh konstruktsii v umovakh temperaturnoho rezhymu vuhlevodnevoi pozhezhi [Methodology for preliminary assessment of fire protection of coatings for steel structures under the conditions of the temperature regime of a hydrocarbon fire.] *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 1(1), 59–65.
11. Kovalev, A., Kachkar, E., Zobenko, N., & Dolishniy, Yu. (2014). Eksperymentalne doslidzhennia vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttia «Amotherm Steel Wb» pry temperaturnomu rezhymovi vuhlevodnevoi pozhezhi [Experimental study of the fire protection ability of the coating "Amotherm Steel Wb" at the temperature regime of a hydrocarbon fire.] *Fire safety: theory and practice*. (17), 53–60.
12. R. M. Tatsii, & O. Y. Pazen, (2018) Direct (Classical) Method of Calculation of the Temperature Field in a Hollow Multilayer Cylinder. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. vol. 91:1373–1384. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1871-3>
13. Tatsii, R., Pazen, O., & Shipot, L. (2020). Doslidzhennia temperaturnoho polia v systemi bahatosharovykh tsylindrychnykh tverdykh til za umov pozhezhi. [Investigation of the temperature field in a system of multilayer cylindrical solids under fire conditions.] *Fire Safety*, (37), 64–71. <https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.10>

© Р. М. Тацій, О. В. Лазаренко,  
А. М. Кастраниць, М. І. Тацій, С. С. Сергеев, 2026.

**Науково-методична стаття.**

Надійшла до редакції 02.03.2026.

Прийнята до друку 29.04.2026.

Опублікована 25.05.2026.