

УДК 614.841.45

ОЦІНЮВАННЯ НЕОБХІДНОЇ ТОВЩИНИ ВОГНЕЗАХИСТУ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА СЦЕНАРІЯМИ УМОВНОЇ ПОЖЕЖІ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2.47-61>

Новак С. В.^{1*}, ORCID iD 0000-0001-7087-318X

Пустовий М. М.², ORCID iD 0000-0003-1434-4296

Маладика І. Г.³, ORCID iD 0000-0001-8784-2814

*E-mail: novak.s.fire@gmail.com

¹Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна

²Національний університет цивільного захисту України, Україна

³Черкаський державний технологічний університет, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

28.09.2024

Пройшла рецензування:

10.10.2024

Опубліковано:

11.12.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

аналітична залежність,
вогнезахисний матеріал,
сталева конструкція,
сценарій пожежі,
температурний режим,
теплофізичні властивості,
товщина вогнезахисту.

АНОТАЦІЯ

Зважаючи на практичну значимість і недостатню визначеність даних щодо параметрів систем вогнезахисту для сталевих конструкцій за номінальними температурними режимами пожежі, які відрізняються від стандартного температурного режиму, актуальними є дослідження, спрямовані на удосконалення і розвиток методів оцінювання необхідної товщини вогнезахисту цих конструкцій за різними сценаріями умовної пожежі. Проведене дослідження ставило за мету визначення аналітичних залежностей співвідношення значень необхідної товщини вогнезахисного покриття для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі і її значень за стандартного температурного режиму від параметрів сталевих конструкцій, що прийнятні для інженерних розрахунків.

Застосовано метод дослідження, складовими якого є процедури чисельного моделювання теплового стану сталевих конструкцій за сценаріями умовної пожежі, апроксимації отриманих розрахункових даних із використанням регресійних моделей, порівняння розрахункових значень з експериментальними. За результатами проведеного дослідження визначено співвідношення між значеннями необхідної товщини вогнезахисного покриття за різними сценаріями умовної пожежі для різних значень коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності вогнезахисного покриття, коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій. Визначено вплив параметрів сталевих конструкцій на це співвідношення. Проведено апроксимацію отриманих розрахункових даних щодо зазначених співвідношень із застосуванням двох рівнянь лінійної регресії (для сценарію з температурним режимом вуглеводневої пожежі і для сценарію з температурним режимом зовнішньої пожежі). Показано, що отримані аналітичні залежності (моделі регресії) за значеннями коефіцієнта детермінації і критерію Фішера є якісними і адекватними. Встановлено, що отримані аналітичні залежності є прийнятними для інженерних розрахунків щодо прогнозування необхідної товщини пасивних і реактивних вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі.

Постановка проблеми. Відповідно до Єврокоду 1 вогнестійкість будівельних конструкцій оцінюють за різними сценаріями пожежі [1]. Для сталевих балок і колон (далі – сталевих конструкцій) таке оцінювання здійснюють як за сценаріями

реальної пожежі, так і за сценаріями умовної пожежі, в яких застосовують різні номінальні температурні режими, серед яких стандартний температурний режим і температурні режими вуглеводневої й зовнішньої пожежі [1; 2]. Для сталевих

конструкцій найбільш поширеним є нормування і перевіряння їхньої вогнестійкості за сценарієм зі стандартним температурним режимом [3]. Для цього сценарію розроблено стандартизовані методи оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій і необхідної мінімальної товщини (далі – товщини) їхнього вогнезахисту [4–7]. За цими методами за сценарію зі стандартним температурним режимом визначено значення товщини для різних систем вогнезахисту [8; 9]. Однак у певних ситуаціях користувачам вогнезахисних матеріалів необхідно мати дані про параметри систем вогнезахисту сталевих конструкцій для сценаріїв з іншими номінальними температурними режимами ніж стандартний – з режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі, які регламентовано в EN 1363-2 [10]. Отримування таких даних експериментальним шляхом зазвичай є проблематичним через необхідність значних додаткових витрат на випробування, особливо під час оцінювання за температурного режиму вуглеводневої пожежі, а існуючі розрахункові методи потребують удосконалення.

Зважаючи на вищенаведене і недостатню визначеність та практичну значимість зазначених даних щодо параметрів систем вогнезахисту, актуальним слід вважати дослідження, спрямовані на подальше удосконалення і розвиток методів оцінювання необхідної товщини вогнезахисту сталевих конструкцій за різними сценаріями умовної пожежі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Згідно з EN 13381-4 [6] і EN 13381-8 [7] значення необхідної товщини пасивних і реактивних систем вогнезахисту, призначених для сталевих конструкцій, залежить від коефіцієнта поперечного перерізу й критичної температури цих конструкцій, нормованого проміжку часу збереженості їхньої вогнестійкості й властивостей застосованих вогнезахисних матеріалів. У

роботах [11–16] наведено результати досліджень, орієнтованих на оцінювання співвідношення між значеннями цієї товщини, визначеними за сценаріями умовної пожежі із використанням температурних режимів вуглеводневої та зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 [10], і значеннями, отриманими за стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 [17].

У дослідженнях [11; 12] було застосовано експериментальний метод, за якого в умовах впливу номінальних температурних режимів пожежі визначали проміжки часу до досягнення критичних температур сталевих конструкцій, оснащених пасивними і реактивними системами вогнезахисту із різною товщиною. За результатами цих досліджень визначено дані щодо співвідношення проміжків часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій, визначених за температурного режиму вуглеводневої пожежі й стандартного температурного режиму, але співвідношення товщини за цими номінальними температурними режимами не оцінювали.

У дослідженнях [13–15] використовували експериментально-розрахунковий метод, який полягає в експериментальному визначенні у різні проміжки часу впливу певного номінального температурного режиму температури сталевих конструкцій, ідентифікації за отриманими експериментальними даними щодо цієї температури теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу шляхом розв’язання оберненої задачі теплопровідності й розрахунку товщини системи вогнезахисту шляхом розв’язання прямої задачі теплопровідності для умов впливу різних номінальних температурних режимів. У роботі [13] експерименти проводили із застосуванням сталевих пластин квадратної форми зі стороною 500 мм завтовшки 5 мм за температурного режиму вуглеводневої пожежі і було отримано залежності товщини реактивного вогнезахисного покриття певної торгової

марки від товщини сталевий пластини для критичної температури 500 °C для умов впливу температурного режиму вуглеводневої пожежі й стандартного температурного режиму тривалістю 30 хв. У роботах [14; 15] експерименти проводили за стандартного температурного режиму із застосуванням стандартних наборів зразків сталевих конструкцій двотаврового профілю згідно з EN 13381-4 [6] та EN 13381-8 [7] і було отримано дані про співвідношення між значеннями необхідної товщини пасивного і реактивного вогнезахисних покриттів певних торгових марок за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі і стандартного температурного режиму для сталевих конструкцій, які мають широкий діапазон змінювання їхніх параметрів – коефіцієнта поперечного перерізу від 40 м⁻¹ до 300 м⁻¹, критичної температури від 350 °C до 700 °C і проміжку часу збереженості вогнестійкості від 30 хв до 60 хв.

У дослідженні [16] було застосовано розрахунковий метод з використанням одновимірної двошарової математичної моделі теплопровідності, за якого в умовах впливу номінальних температурних режимів пожежі визначали значення товщини гіпотетичного покриття, який має незалежні від температури теплофізичні властивості. За результатами цього дослідження визначено дані щодо товщини вогнезахисного покриття для різних значень коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу, коефіцієнта поперечного перерізу і критичної температури сталевий конструкції та проміжку часу збереженості її вогнестійкості для умов вогневого впливу за номінальними температурними режимами пожежі, а також дані щодо співвідношення між значеннями цієї товщини, отриманими за різних номінальних температурних режимів.

Підсумовуючи, варто зазначити, що вищенаведені результати досліджень в певній мірі є прийнятними для оцінювання товщини вогнезахисту сталевих конструкцій за різними сценаріями

умовної пожежі. Однак практичне застосування запропонованого в цих дослідженнях експериментального підходу вимагає значних витрат на проведення випробувань, а застосування експериментально-розрахункового підходу – використання спеціального програмного забезпечення для розв'язання оберненої і прямої задач теплопровідності, що зазвичай не є прийнятним для інженерів-проектувальників вогнезахисту сталевих конструкцій. Стосовно дослідження із застосуванням розрахункового метода, то отримані в ньому результати містять дані про співвідношення між значеннями товщини гіпотетичного покриття за різних номінальних температурних режимів, але не оцінена можливість їхнього практичного застосування для реалістичних вогнезахисних покриттів. Вищенаведені результати досліджень не містять аналітичних залежностей щодо цього співвідношення, які були б прийнятними для інженерних розрахунків стосовно прогнозного оцінювання товщини вогнезахисту за різними сценаріями умовної пожежі. Тому є підстави вважати, що недостатня визначеність зазначених залежностей обумовлює необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

Формулювання цілей дослідження. За мету дослідження ставилось визначення аналітичних залежностей співвідношення значень необхідної товщини вогнезахисного покриття для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі і її значень за стандартного температурного режиму від параметрів сталевий конструкції, що прийнятні для інженерних розрахунків.

Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання:

– визначити співвідношення значень товщини вогнезахисного покриття для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі і її значень за стандартного температурного режиму для різних значень коефіцієнта

теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності застосовного вогнезахисного матеріалу, коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції;

– провести апроксимацію отриманих розрахункових даних щодо зазначених співвідношень із застосуванням рівнянь регресії;

– здійснити оцінювання прийнятності отриманих аналітичних залежностей щодо співвідношення значень товщини вогнезахисного покриття за різних сценаріїв умовної пожежі для інженерних розрахунків.

Виклад основного матеріалу та метод дослідження. Застосовано метод дослідження, складовими якого є процедури аналізування джерел інформації, чисельного моделювання теплового стану сталевій конструкції за сценаріями умовної пожежі, апроксимації отриманих розрахункових даних із використанням регресійних моделей, порівняння розрахункових значень з експериментальними.

Для визначення співвідношення значень товщини вогнезахисного покриття для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі і її значень за стандартного температурного режиму для різних значень коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності застосовного вогнезахисного матеріалу, коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції використано процедуру, наведену в роботі [18]. Відповідно до цієї процедури для сценарію умовної пожежі за стандартного температурного режиму розв'язуванням прямої задачі теплопровідності визначали значення товщини вогнезахисного покриття $d_{p,min}$, за якого для тривалості вогневого впливу, що відповідає проміжку часу збереженості вогнестійкості t_{fr} , розрахункова температура сталевій конструкції $\theta_{a,calc}$ із коефіцієнтом

поперечного перерізу A_m/V дорівнює критичній температурі θ_{cr} . Розрахунки товщини $d_{p,min}$ виконували для всіх комбінацій значень коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу ($\lambda_{p,min} = 0,02$ Вт/(м·°С); $\lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°С); $\lambda_{p,max} = 2,0$ Вт/(м·°С)) та його питомої об'ємної теплоємності ($(c_p\rho_p)_{min} = 0,1$ МДж/(м³·°С); $(c_p\rho_p)_{med} = 0,5$ МДж/(м³·°С); $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°С)), коефіцієнта поперечного перерізу ($(A_m/V)_{min} = 40$ м⁻¹; $(A_m/V)_{med} = 150$ м⁻¹; $(A_m/V)_{max} = 300$ м⁻¹); критичної температури ($\theta_{cr,min} = 350$ °С; $\theta_{cr,med} = 500$ °С; $\theta_{cr,max} = 700$ °С) і проміжку часу збереженості вогнестійкості ($t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв). Таким же чином визначали значення товщини $d_{p,min,HC}$ і $d_{p,min,ef}$ для сценарію умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі. Особливість цього розрахунку для сценарію умовної пожежі за температурного режиму зовнішньої пожежі полягала в тому, що значення товщини $d_{p,min,ef}$ визначали тільки для $\theta_{cr,min} = 350$ °С і $\theta_{cr,med} = 500$ °С через те, що номінальна температура нагрівального газового середовища за цим режимом не перевищує 680 °С [10].

За формулами (1), (2) обчислювали різниці $\delta_{d,HC}$ (%) і $\delta_{d,ef}$ (%) між значеннями товщини вогнезахисного покриття, отриманими для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі, і значеннями товщини, визначеними за стандартного температурного режиму. Отримані результати цього розрахунку для різниці $\delta_{d,HC}$ подано в табл. 1. Відсутність певних даних у цій таблиці означає те, що сталева конструкція для зазначених параметрів не потребує вогнезахисту. Це пов'язано з тим, що для цих параметрів сталева конструкція без вогнезахисного покриття не досягає критичної температури $\theta_{cr,max} = 700$ °С.

$$\delta_{d,HC} = 100(d_{p,min,HC} - d_{p,min})/d_{p,min}; \quad (1)$$

$$\delta_{d,ef} = 100(d_{p,min,ef} - d_{p,min})/d_{p,min}, \quad (2)$$

$d_{p,min,HC}$ і $d_{p,min,ef}$ – значення товщини вогнезахисного покриття, отримані для

сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі, мм;

$d_{p,min}$ – значення товщини вогнезахисного покриття, отримане для сценарію умовної пожежі за стандартного температурного режиму, мм.

Таблиця 1 – Результати розрахунку різниці $\delta_{d,HC}$

A_m/V , M^{-1}	λ_p , Вт/(м·°C)	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
Різниця $\delta_{d,HC}$ (%) для $(c_p\rho_p)_{min}$:										
40	0,02	97,7	176,5	–	33,7	39,5	59,2	9,6	9,8	10,6
150	0,02	69,3	91,8	213,8	30,4	35,9	50,0	9,1	8,9	10,2
300	0,02	63,3	83,3	169,6	28,4	34,1	47,7	8,4	8,7	9,7
40	0,2	95,4	182,4	–	32,7	38,9	59,7	9,3	9,8	10,7
150	0,2	63,6	89,0	210,3	25,6	32,8	47,7	8,1	8,4	9,8
300	0,2	50,6	73,7	162,2	20,4	26,9	42,3	6,6	7,5	8,9
40	2,0	91,5	179,0	–	28,6	37,7	58,8	8,5	9,4	10,4
150	2,0	47,1	74,5	193,1	18,3	23,9	38,9	6,5	7,1	8,6
300	2,0	35,6	53,8	127,8	15,5	20,0	30,5	5,9	6,5	7,2
Різниця $\delta_{d,HC}$ (%) для $(c_p\rho_p)_{med}$:										
40	0,02	97,7	176,5	–	32,9	39,8	59,2	9,5	9,9	10,6
150	0,02	66,5	90,6	213,8	27,7	34,4	49,2	8,5	9,2	10,1
300	0,02	55,9	78,2	167,6	22,3	29,4	44,9	7,3	7,7	8,7
40	0,2	93,4	179,9	–	31,1	38,2	59,4	8,9	9,5	10,5
150	0,2	52,5	80,4	202,1	19,8	27,1	42,7	6,7	7,6	8,6
300	0,2	38,4	59,1	142,0	16,2	21,3	33,7	5,7	7,0	7,7
40	2,0	83,9	173,6	–	24,6	33,0	55,0	7,4	8,6	10,1
150	2,0	41,5	63,6	165,6	16,3	21,4	31,5	6,2	6,9	7,6
300	2,0	33,7	48,9	106,2	14,8	19,1	27,3	5,9	6,5	7,2
Різниця $\delta_{d,HC}$ (%) для $(c_p\rho_p)_{max}$:										
40	0,02	95,3	176,5	–	32,7	40,2	59,2	9,3	9,8	10,7
150	0,02	63,6	88,4	210,3	25,6	32,5	47,7	8,1	8,4	9,7
300	0,02	51,0	73,7	160,3	20,4	27,0	42,3	6,6	7,5	8,9
40	0,2	91,5	179,0	–	28,6	37,7	59,1	8,3	9,4	10,3
150	0,2	47,1	74,5	193,1	18,3	24,4	38,9	6,6	7,1	8,3
300	0,2	35,6	53,8	127,8	15,5	20,0	30,5	5,8	6,7	7,4
40	2,0	80,8	171,6	–	22,9	31,1	52,5	7,8	8,6	9,5
150	2,0	42,5	63,5	157,2	17,1	20,7	30,9	6,5	7,0	7,5
300	2,0	36,7	51,4	104,5	15,2	19,7	26,4	6,2	6,7	7,4

Із аналізу отриманих результатів розрахунку випливає, що величина різниці $\delta_{d,HC}$ знаходиться в межах від 5,7 % до 214 %, а величина різниці $\delta_{d,ef}$ – від 7,6 % до 64,7 %. Певні графічні залежності різниць $\delta_{d,HC}$ і $\delta_{d,ef}$ від λ_p , $c_p\rho_p$, A_m/V , θ_{cr} , t_{fr} , що побудовані за отриманими результатами, наведено на рис. 1–3. Із підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу A_m/V величина різниць $\delta_{d,HC}$ і $\delta_{d,ef}$ зменшується, а із підвищенням критичної температури θ_{cr} – збільшується (рис. 1). Підвищення проміжку часу збереженості вогнестійкості t_{fr} призводить до зменшення величини різниці $\delta_{d,HC}$, а для різниці $\delta_{d,ef}$ – до її

збільшення (рис. 2). При підвищенні коефіцієнта теплопровідності λ_p і питомої об'ємної теплоємності вогнезахисного матеріалу $c_p\rho_p$ величина різниць $\delta_{d,HC}$ і $\delta_{d,ef}$ зменшується (рис. 3). Найбільший вплив на величину цих різниць має проміжок часу t_{fr} , а найменший – питома об'ємна теплоємність $c_p\rho_p$. Зокрема, підвищення проміжку часу t_{fr} від 30 хв до 240 хв може призводити до зменшення різниці $\delta_{d,HC}$ у 22 рази, а підвищення питомої об'ємної теплоємності $c_p\rho_p$ від 0,1 МДж/(м³·°C) до 1,0 МДж/(м³·°C) – до зменшення різниці $\delta_{d,HC}$ не більше ніж у 1,4 рази.

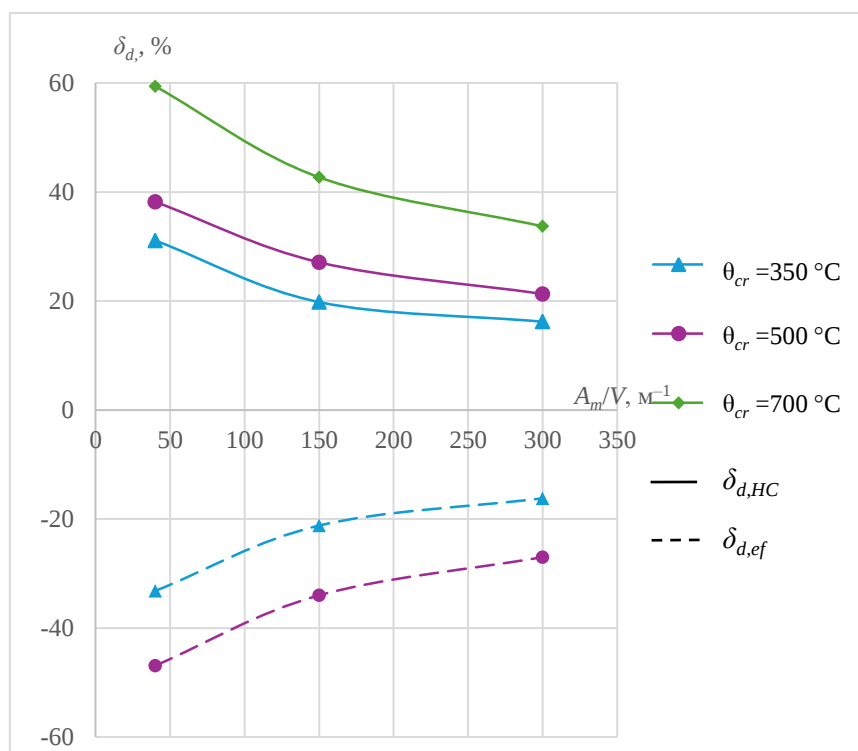


Рисунок 1 – Залежності різниць $\delta_{d,HC}$ і $\delta_{d,ef}$ від коефіцієнта поперечного перерізу A_m/V для різних θ_{cr} і значень $\lambda_{p,med}$, $(c_p\rho_p)_{med}$, $t_{fr,med}$

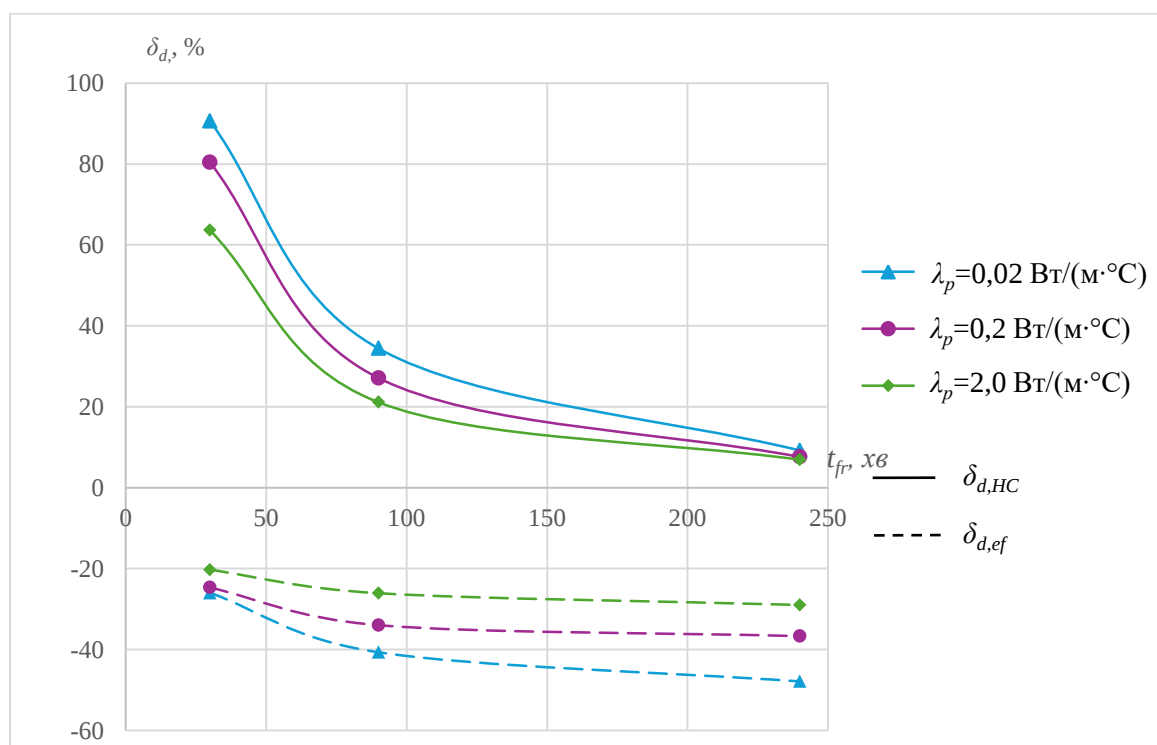


Рисунок 2 – Залежності різниць $\delta_{d,HC}$ і $\delta_{d,ef}$ від проміжку часу t_{fr} для різних λ_p і значень $(c_p\rho_p)_{med}$, $(A_m/V)_{med}$, $\theta_{cr,med}$

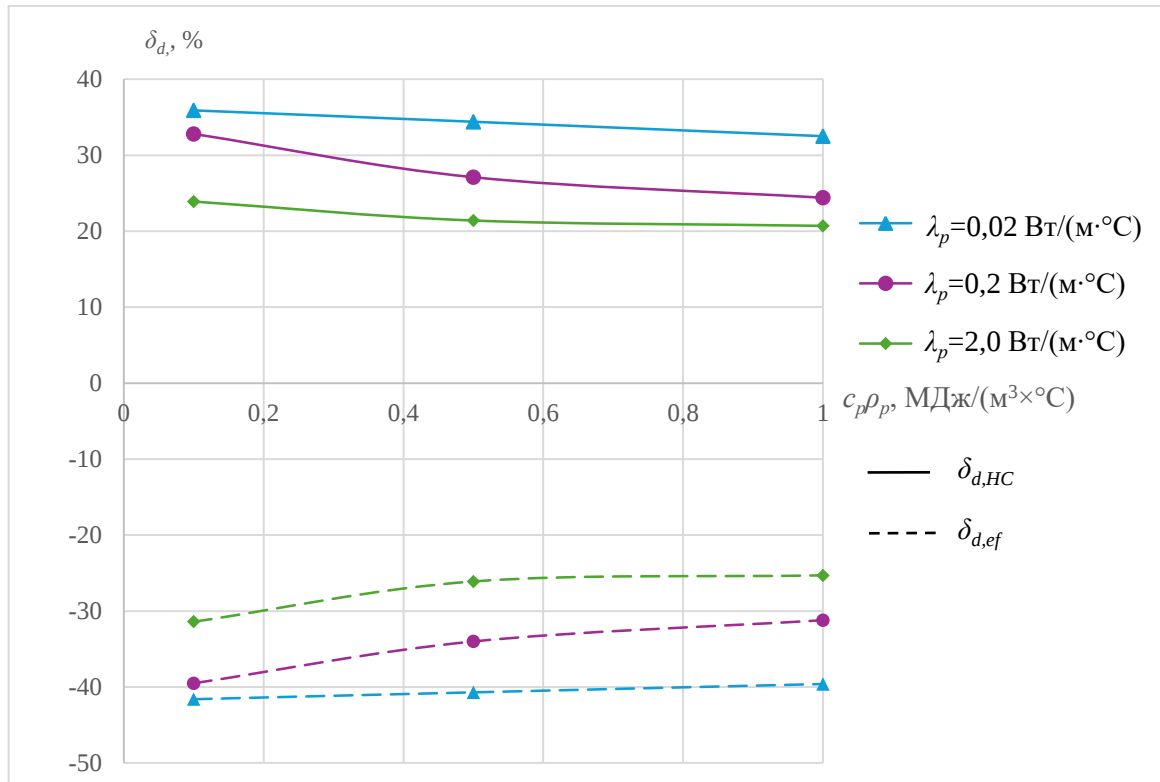


Рисунок 3 – Залежності різниць $\delta_{d,HC}$ і $\delta_{d,ef}$ від питомої об'ємної теплоємності $c_p \rho_p$ для різних λ_p і значень $(A_m/V)_{med}$, $\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$

Для апроксимації отриманих розрахункових даних щодо різниць $\delta_{d,HC}$ і $\delta_{d,ef}$ застосовано такі рівняння (моделі) лінійної регресії, які визначають аналітичні залежностей цих різниць від A_m/V , θ_{cr} , t_{fr} для різних значень λ_p , $c_p \rho_p$:

$$\delta_{d,HC} = a_0 + a_1(A_p/V)^{-1} + a_2(A_p/V)^{-1}t_{fr}^{-1} + a_3\theta_{cr} + a_4(A_p/V)^{-1}\theta_{cr} + a_5(A_p/V)^{-1}t_{fr}^{-1}\theta_{cr} + a_6t_{fr}^{-1}\theta_{cr} + a_7t_{fr}^{-1} \quad (3)$$

$$\delta_{d,ef} = a_0 + a_1(A_p/V)^{-1} + a_2(A_p/V)^{-1}t_{fr} + a_3\theta_{cr} + a_4(A_p/V)^{-1}\theta_{cr} + a_5(A_p/V)^{-1}t_{fr}\theta_{cr} + a_6t_{fr}\theta_{cr} + a_7t_{fr} \quad (4)$$

де a_0 – a_7 – коефіцієнти регресії.

Із застосуванням комп'ютерної програми для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel здійснено розв'язання зазначених рівнянь регресії щодо визначення значень коефіцієнтів регресії із використанням отриманих даних щодо різниць $\delta_{d,HC}$ і $\delta_{d,ef}$. При цьому розглянуто такі варіанти:

– варіанти В1-НС і В1-ef – вогнезахисний матеріал має низький коефіцієнт теплопровідності ($\lambda_{p,min} = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$) й низьку питому об'ємну теплоємність ($(c_p \rho_p)_{min} = 0,1 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$);

– варіанти В2-НС і В2-ef – вогнезахисний матеріал має середній коефіцієнт теплопровідності ($\lambda_{p,med} = 0,2$

$\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$) й середню питому об'ємну теплоємність ($(c_p \rho_p)_{med} = 0,5 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$);

– варіанти В3-НС і В3-ef – вогнезахисний матеріал має високий коефіцієнт теплопровідності ($\lambda_{p,max} = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$) й високу питому об'ємну теплоємність ($(c_p \rho_p)_{max} = 1,0 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$).

В табл. 2 для варіанту В1-ef подано вихідні дані щодо різниць $\delta_{d,ef}$, які було застосовано для розв'язання рівняння (4), розрахункові значення $\delta_{d,ef,calc}$, обчислені за цим рівнянням, та значення відхилення ($\delta_{d,ef,calc} - \delta_{d,ef}$) розрахункових від вихідних даних. Результати визначення коефіцієнтів регресії для усіх вищенаведених варіантів подано в табл. 3. В цих таблицях також

наведено отримані під час розв'язання рівнянь регресії значення стандартного відхилення S_d (середньо квадратичного відхилення різниць $\delta_{d,HC,calc}$ і $\delta_{d,ef,calc}$ від різниць $\delta_{d,HC}$ і $\delta_{d,ef}$), коефіцієнта

детермінації R^2 і критерія Фішера F . За отриманими значеннями коефіцієнта детермінації і критерія Фішера випливає, що якість моделей (3) і (4) є гарною і вони є адекватними.

Таблиця 2 – Дані для розрахунку за варіанту B1-ef

A_m/V , m^{-1}	θ_{cr} , $^{\circ}C$	t_{fr} , хв	$\delta_{d,ef}$, %	$\delta_{d,ef,calc}$, %	$\delta_{d,ef,calc} - \delta_{d,ef}$, %
40	350	30	-25,6	-27,5	-1,9
40	500	30	-64,7	-58,5	6,2
40	350	90	-35,1	-32,5	2,6
40	500	90	-48,2	-56,5	-8,3
40	350	240	-43,9	-45,0	-1,1
40	500	240	-53,7	-51,5	2,2
150	350	30	-16,7	-20,5	-3,8
150	500	30	-26,8	-31,6	-4,8
150	350	90	-31,8	-26,1	5,7
150	500	90	-41,6	-37,2	4,4
150	350	240	-40,7	-40,3	0,4
150	500	240	-51,2	-51,2	0,0
300	350	30	-15,6	-19,2	-3,6
300	500	30	-23,6	-26,7	-3,1
300	350	90	-29,7	-25,0	4,7
300	500	90	-40,0	-33,7	6,3
300	350	240	-36,3	-39,4	-3,1
300	500	240	-48,3	-51,2	-2,9

Таблиця 3 – Результати визначення розрахункових параметрів

Розрахункові параметри	Значення розрахункових параметрів для варіантів:					
	B1-NC	B2-NC	B3-NC	B1-ef	B2-ef	B3-ef
a_0	28,52	24,37	18,86	-8,807	2,921	-1,399
a_1	131,9	415,3	508,9	2572	1928	2598
a_2	-21498	-35789	-102976	-14,12	-12,03	-12,92
a_3	-0,0564	-0,0518	-0,0348	-0,01764	-0,03267	-0,01225
a_4	-1,656	-2,249	-2,791	-8,494	-7,568	-9,378
a_5	281,6	386,2	545,4	0,04206	0,03345	0,04043
a_6	11,29	10,78	6,495	-0,0002753	-0,0001977	-0,0002005
a_7	-2867	-3361	-1873	-0,00180	0,02702	0,02024
S_d	10,94	11,48	9,17	5,61	4,50	4,59
R^2	0,973	0,967	0,970	0,893	0,939	0,927
F	91,62	74,74	82,01	11,97	21,99	18,24

Для оцінювання прийнятності практичного застосування рівнянь (3) і (4) із коефіцієнтами регресії, поданими в табл. 3, здійснено порівняння даних щодо товщини вогнезахисних покриттів $d_{p,min,HC,calc}$ і $d_{p,min,ef,calc}$ із пасивного вогнезахисного матеріалу і реактивного вогнезахисного матеріалу, що спучується, для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожеж, обчислених за цими рівняннями, зі значеннями $d_{p,min,HC}$ і $d_{p,min,ef}$,

отриманими для цих же сценаріїв експериментально-розрахунковим методом [14; 15; 19]. Розрахункові величини товщини $d_{p,min,HC,calc}$ (мм) і $d_{p,min,ef,calc}$ (мм) визначали за формулами (5), (6) із застосуванням рівнянь (3), (4) і значень коефіцієнтів регресії, поданих в табл. 3 для різних варіантів. Під час цього розрахунку застосовували такі значення коефіцієнта поперечного перерізу: $(A_m/V)_{min} = 40 \text{ м}^{-1}$, $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$, $(A_m/V)_{max} = 300 \text{ м}^{-1}$; критичної

температури: $\theta_{cr,min} = 350$ °C, $\theta_{cr,med} = 500$ °C, $\theta_{cr,max} = 700$ °C і проміжку часу збереженості вогнестійкості: $t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 120$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв – для сталевих конструкцій з пасивним вогнезахисним покриттям і $t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 45$ хв; $t_{fr,max} = 60$ хв – для сталевих конструкцій з реактивним вогнезахисним покриттям. За формулами (7), (8) визначали значення відносних відхилень $R_{d,HC}$ (%) і $R_{d,ef}$ (%) розрахункової товщини $d_{p,min,HC,calc}$ і $d_{p,min,ef,calc}$ від отриманої експериментально-розрахунковим методом. Результати цих розрахунків для пасивного вогнезахисного покриття і сценарію умовної пожежі за температурним режимом вуглеводневої пожежі наведено в табл. 4. У цій таблиці для кожного варіанту напівжирним шрифтом виділено найменші й найбільші значення $R_{d,HC}$.

$$d_{p,min,HC,calc} = d_{p,min}(1 + \delta_{d,HC}/100); \quad (5)$$

$$d_{p,min,ef,calc} = d_{p,min}(1 + \delta_{d,ef}/100); \quad (6)$$

$$R_{d,HC} = 100(d_{p,min,HC,calc} - d_{p,min,HC})/d_{p,min,HC}; \quad (7)$$

$$R_{d,ef} = 100(d_{p,min,ef,calc} - d_{p,min,ef})/d_{p,min,ef}; \quad (8)$$

де $d_{p,min}$ – значення товщини вогнезахисного покриття, отримане для сценарію умовної пожежі за стандартного температурного режиму експериментально-розрахунковим методом, мм;

$\delta_{d,HC}$ і $\delta_{d,ef}$ – значення різниць для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі, визначені за рівняннями (3) і (4), %;

$d_{p,min,HC}$ і $d_{p,min,ef}$ – значення товщини вогнезахисного покриття, отримані для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі експериментально-розрахунковим методом, мм.

Таблиця 4 – Результати розрахунку для пасивного вогнезахисного покриття (варіанти В1-НС, В2-НС, В3-НС)

$A_m/V, \text{ м}^{-1}$	$\theta_{cr}, \text{ °C}$	$t_{fr}, \text{ хв}$	$d_{p,min}, \text{ мм}$	$d_{p,HC}, \text{ мм}$	$d_{p,HC,calc}, \text{ мм, В1-НС}$	$R_{d,HC}, \%, \text{ В1-НС}$	$d_{p,HC,calc}, \text{ мм, В2-НС}$	$R_{d,HC}, \%, \text{ В2-НС}$	$d_{p,HC,calc}, \text{ мм, В3-НС}$	$R_{d,HC}, \%, \text{ В3-НС}$
40	350	30	4,47	9,56	8,85	-7,4	8,65	-9,5	8,1	-15,1
40	500	30	1,69	5,46	4,65	-14,9	4,72	-13,5	4,5	-17,5
40	350	120	26,0	32,9	31,9	-3,1	31,5	-4,3	30,3	-7,8
40	500	120	17,3	23,0	22,7	-1,5	22,6	-1,9	21,8	-5,1
40	700	120	9,04	13,5	12,8	-5,0	12,9	-4,3	12,5	-7,1
40	350	240	49,8	54,0	54,9	1,6	54,3	0,5	52,7	-2,4
40	500	240	36,7	40,9	39,2	-4,1	38,8	-5,3	37,7	-7,8
40	700	240	23,2	26,1	23,8	-8,8	23,4	-10,2	22,9	-12,4
150	350	30	12,2	21,2	19,4	-8,5	17,0	-19,7	16,7	-21,5
150	500	30	8,13	16,2	17,5	7,8	16,0	-1,5	14,6	-10,1
150	700	30	2,95	10,0	8,53	-14,7	8,0	-19,8	7,0	-30,4
150	350	120	39,5	47,0	47,1	0,1	44,5	-5,3	44,2	-6,1
150	500	120	33,5	41,4	42,0	1,5	40,0	-3,4	39,0	-5,8
150	700	120	24,3	32,4	32,5	0,4	31,2	-3,8	29,8	-8,0
150	350	240	62,8	67,4	70,6	4,8	68,0	0,9	67,6	0,3
150	500	240	56,1	60,5	62,0	2,5	59,8	-1,2	59,5	-1,7
150	700	240	46,0	50,2	49,7	-1,0	48,0	-4,4	47,7	-4,9
300	350	30	16,0	24,0	24,3	1,3	20,8	-13,5	20,5	-14,5
300	500	30	12,5	21,9	25,5	16,4	22,7	3,4	20,4	-6,9
300	700	30	6,11	15,5	16,7	7,6	15,3	-1,5	12,8	-17,3
300	350	120	43,5	50,0	51,5	3,1	48,4	-3,3	48,2	-3,5
300	500	120	38,6	45,8	48,0	4,9	45,3	-1,1	44,3	-3,4
300	700	120	31,5	39,0	41,7	7,0	39,6	1,5	37,7	-3,3
300	350	240	67,2	72,0	75,9	5,4	72,6	0,9	72,6	0,8
300	500	240	61,2	65,9	68,1	3,3	65,3	-0,9	65,2	-1,0
300	700	240	53,0	57,5	57,8	0,5	55,6	-3,3	55,5	-3,5

В табл. 5 для пасивного і реактивного вогнезахисних покриттів наведено узагальнені дані щодо відносних відхилень $R_{d,HC}$ і $R_{d,ef}$. У цій таблиці подано такі позначення: S_R – стандартні (середньо квадратичні) значення відхилень $R_{d,HC}$ і $R_{d,ef}$ для певного варіанту; $R_{d,min}$ і $R_{d,max}$ – мінімальне і максимальне значення

відхилень $R_{d,HC}$ і $R_{d,ef}$ для певного варіанту; $(R_{d,max} - R_{d,min})$ – ширина інтервалу, в якому для певного варіанту знаходяться значення відхилень $R_{d,HC}$ і $R_{d,ef}$. Напівжирним шрифтом виділено найменші значення S_R і $(R_{d,max} - R_{d,min})$ для варіантів з найкращою збіжністю.

Таблиця 5 – Узагальнені дані щодо відхилень $R_{d,HC}$ і $R_{d,ef}$

Відхилення	B1-НС	B2-НС	B3-НС	B1-ef	B2-ef	B3-ef
	Значення відхилень (%) для пасивного вогнезахисного покриття:					
S_R	7,1	6,1	7,4	9,0	5,4	10,3
$R_{d,min}$	-14,9	-19,8	-30,4	-29,3	-14,9	-11,4
$R_{d,max}$	16,4	3,4	0,8	4,7	10,4	39,8
$R_{d,max} - R_{d,min}$	31,3	23,2	31,2	34,0	25,3	51,2
	Значення відхилень (%) для реактивного вогнезахисного покриття:					
S_R	17,8	16,7	16,9	11,2	14,6	15,4
$R_{d,min}$	-71,5	-72,1	-75,8	-39,5	-40,2	-37,7
$R_{d,max}$	-4,3	-6,5	-12,3	6,0	17,0	24,8
$R_{d,max} - R_{d,min}$	67,2	65,6	57,5	45,5	57,2	62,5

Із аналізу даних, наведених в табл. 5, випливає, що для пасивного вогнезахисного покриття має місце добра збіжність результатів розрахунку його товщини для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі, отриманих за аналітичними залежностями (3) і (4), зі значеннями товщини покриття, визначеними для цих же сценаріїв експериментально-розрахунковим методом [14]. При цьому найкраща збіжність, яку визначено за критерієм найменших значень ширини інтервалу $(R_{d,max} - R_{d,min})$ і стандартного відхилення S_R , спостерігається для варіантів B2-НС і B2-ef, за яких вогнезахисний матеріал має середній коефіцієнт теплопровідності ($\lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°C)) й середню питому об'ємну теплоємність $((c_p \rho_p)_{med} = 0,5$ МДж/(м³·°C)). Для цих варіантів величина відхилення не перевищує 19,8 % і 14,9 %, відповідно.

Для реактивного вогнезахисного покриття можна вважати за задовільну збіжність результатів розрахунку для сценарію умовної пожежі за

температурного режиму зовнішньої пожежі, отриманих за аналітичною залежністю (4) для варіанту B1-ef ($\lambda_{p,min} = 0,02$ Вт/(м·°C) і $((c_p \rho_p)_{min} = 0,1$ МДж/(м³·°C)), зі значеннями, визначеними для цього ж сценарію експериментально-розрахунковим методом [15]. Для сценарію умовної пожежі за температурного режиму вуглеводневої пожежі всі значення товщини вогнезахисного покриття, отримані за аналітичною залежністю (3), менші ніж визначені для цього ж сценарію експериментально-розрахунковим методом [15]. Це можна пояснити таким.

Під час нагрівання реактивного вогнезахисного покриття до певної температури в ньому відбувається хімічна реакція, яка призводить до утворення спученого теплоізоляційного шару, товщина якого значно перевищує початкову товщину покриття [7]. При цьому коефіцієнт теплопровідності покриття значно зменшується, а подальше підвищення температури призводить до його збільшення через властивості звугленої структури, яку було утворено в

результаті процесу спучування [20; 21]. Різниця між мінімальним і максимальним значеннями коефіцієнта теплопровідності звугленої структури є значною. Зокрема, для реактивного вогнезахисного покриття, застосованого у даному дослідженні, ці мінімальне і максимальне значення становлять $0,00351 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$ і $0,140 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$ (за температури 1100°C) [15]. Аналітичну залежність (3) розроблено на основі положення про незалежність коефіцієнта теплопровідності покриття від температури, як для сценарію умовної пожежі за температурного режиму вуглеводневої пожежі, та і для сценарію за стандартного температурного режиму. Ця залежність не враховує підвищену інтенсивність нагрівання сталевій конструкції для сценарію з вуглеводневою пожежею (порівняно зі сценарієм за стандартного температурного режиму), яку викликано значним збільшенням коефіцієнта теплопровідності покриття. Цю підвищену інтенсивність нагрівання через значне збільшення коефіцієнта теплопровідності враховано під час розрахунку товщини вогнезахисного покриття для сценарію з вуглеводневою пожежею експериментально-розрахунковим методом [15]. Тому значення товщини реактивного вогнезахисного покриття, отримані за аналітичною залежністю (3), менші величин, визначених для сценарію умовної пожежі за температурного режиму вуглеводневої пожежі експериментально-розрахунковим методом.

Результати, отримані в рамках даного дослідження, можуть вважатися за доцільні з практичної точки зору, тому що вони дозволяють обґрунтовано підходити до визначення необхідної товщини систем вогнезахисту сталевих конструкцій конкретних торгових марок для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі за наявності даних щодо цієї товщини, встановлених для сценарію за стандартного температурного режиму. Отримані аналітичні залежності дозволяють визначати ці товщини для

пасивних систем вогнезахисту з достатньою для інженерних розрахунків точністю. Для реактивних систем вогнезахисту ці залежності для сценарію умовної пожежі за температурного режиму зовнішньої пожежі дозволяють визначати товщину із задовільною точністю, а для сценарію з вуглеводневою пожежею – надавати оцінку необхідної товщини систем вогнезахисту, що визначає значення, менше яких не можуть бути дійсні величини товщини. З теоретичної точки зору ці результати дозволяють стверджувати про визначеність аналітичного метода оцінювання необхідної товщини для пасивних і реактивних систем вогнезахисту для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі. Однак неможливо не зазначити, що отримані аналітичні залежності розроблено на основі положення про незалежність коефіцієнта теплопровідності покриття від температури. Водночас для реалістичних вогнезахисних матеріалів цей коефіцієнт залежить від температури. Найбільш значною ця температурна залежність має місце для реактивних вогнезахисних матеріалів, що спучуються. Для цих матеріалів мінімальне значення коефіцієнта теплопровідності може бути на рівні $0,003 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$, а максимальне значення може перевищувати цю величину на два порядки [20]. Для пасивних вогнезахисних матеріалів температурна залежність коефіцієнта теплопровідності є значно слабкішою. Зокрема, мінімальне значення коефіцієнта теплопровідності пасивного вогнезахисного матеріалу, застосовного в даному дослідженні, становить $0,159 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$, а його максимальне значення дорівнює $0,546 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$ [14]. Через це, для реактивних вогнезахисних матеріалів, у разі застосування отриманих аналітичних залежностей неможна виключити можливість отримання розрахункових даних щодо товщини вогнезахисту, які мають суттєву розбіжність з дійсними величинами. Така невизначеність накладає

певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися, як недоліки даного дослідження. Нemoжливiсть зняти названі обмеження в рамках даного дослідження породжує потенційно цікавий напрям подальших досліджень. Вони, зокрема, можуть бути орієнтовані на проведення аналізу чутливості та виявлення впливу параметрів температурної залежності коефіцієнта теплопровідності реактивних вогнезахисних покриттів на співвідношення значень їхньої необхідної товщини за різними сценаріями умовної пожежі.

Висновки та напрями подальших досліджень. За результатами проведеного дослідження встановлено наступне.

1. Визначено співвідношення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття сталевих конструкцій, яке має сталі, незалежні від температури теплофізичні властивості, для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 і її значень для сценарію за стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 для різних значень коефіцієнта теплопровідності матеріалу ($\lambda_{p,min} = 0,02$ Вт/(м·°C); $\lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°C); $\lambda_{p,max} = 2,0$ Вт/(м·°C)) й питомої об'ємної теплоємності ($(c_p\rho_p)_{min} = 0,1$ МДж/(м³·°C); $(c_p\rho_p)_{med} = 0,5$ МДж/(м³·°C); $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°C)) застосовного вогнезахисного матеріалу, коефіцієнта поперечного перерізу ($(A_m/V)_{min} = 40$ м⁻¹; $(A_m/V)_{med} = 150$ м⁻¹; $(A_m/V)_{max} = 300$ м⁻¹), критичної температури ($\theta_{cr,min} = 350$ °C; $\theta_{cr,med} = 500$ °C; $\theta_{cr,max} = 700$ °C) і проміжку часу збереженості вогнестійкості ($t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв) сталевій конструкції. З'ясовано, що для зазначених параметрів сталевій конструкції величина відносної різниці цієї товщини для сценаріїв з температурним режимом вуглеводневої пожежі й стандартним температурним режимом знаходиться в межах від 5,7 % до 214 %, а для сценарії з температурним режимом зовнішньої

пожежі й стандартним температурним режимом – від 7,6 % до 64,7 %.

2. Виявлено вплив параметрів сталевій конструкції на значення відносної різниці необхідної товщини вогнезахисного покриття для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі і її значень для сценарію за стандартного температурного режиму. З'ясовано, що для сценаріїв з температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі із підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу величина цієї різниці зменшується, а із підвищенням критичної температури – збільшується. Підвищення проміжку часу збереженості вогнестійкості для сценарію з температурним режимом вуглеводневої пожежі призводить до зменшення величини цієї різниці, а для сценарію з температурним режимом зовнішньої пожежі – до її збільшення. Для цих сценаріїв пожежі з підвищенням коефіцієнта теплопровідності і питомої об'ємної теплоємності вогнезахисного матеріалу величина різниці зменшується. Найбільший вплив на величину різниці має проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції, а найменший – питома об'ємна теплоємність вогнезахисного матеріалу. Зокрема, для сценарію з температурним режимом вуглеводневої пожежі підвищення проміжку часу від 30 хв до 240 хв може призводити до зменшення різниці у 22 рази, а підвищення питомої об'ємної теплоємності від 0,1 МДж/(м³·°C) до 1,0 МДж/(м³·°C) – до зменшення різниці не більше ніж у 1,4 рази.

3. Здійснено апроксимацію отриманих розрахункових даних щодо зазначеної відносної різниці необхідної товщини вогнезахисного покриття із застосуванням двох рівнянь лінійної регресії (для сценарію з температурним режимом вуглеводневої пожежі і для сценарію з температурним режимом зовнішньої пожежі). Показано, що отримані аналітичні залежності (моделі регресії) відносної різниці необхідної

товщини вогнезахисного покриття за різними сценаріями умовної пожежі від параметрів сталевих конструкцій за значеннями коефіцієнта детермінації і критерію Фішера є якісними і адекватними.

4. Встановлено, що отримані аналітичні залежності є прийнятними для інженерних розрахунків стосовно прогнозування необхідної товщини пасивних і реактивних вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі. Показано, що для пасивного і реактивного (що спучується) вогнезахисних покриттів певних торгових марок має місце задовільна збіжність результатів розрахунку їхньої необхідної

товщини для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі, отриманих за цими аналітичними залежностями, зі значеннями товщини цих покриття, визначеними для цих же сценаріїв експериментально-розрахунковим методом.

5. Визначено напрями подальших досліджень, які спрямовані на здійснення аналізу чутливості та виявлення впливу параметрів температурної залежності коефіцієнта теплопровідності реактивних вогнезахисних покриттів на співвідношення значень їхньої необхідної товщини для сценаріїв умовної пожежі за температурними режимами вуглеводневої й зовнішньої пожежі і її значень за стандартного температурного режиму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 CEN. 79 p.
2. Yellow book: Fire protection for structural steel in buildings 4 edition. *Association for Specialist Fire Protection*. 2013. <https://asfp.org.uk>.
3. Калафат К., Вахитова Л. Аналитический обзор средств огнезащиты стальных конструкций 2021–2022. Украинский центр сталеного производства, 2022. 230 с.
4. EAD 350140-00-1106 Renderings and rendering kits intended for fire resistant applications. EOTA 2017. 48 p.
5. EAD 350142-00-1106 Fire protective board, slab and mat products and kits. EOTA 2017. 60 p.
6. 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.
7. EN 1363-1:2020 Fire resistance tests – Part 1: General Requirements. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 54 p.
8. EN 1991-1-2:2002/AC:2013 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. European committee for standardization. Central secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 61 p.
9. EN 1363-2:1999 Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999. CEN. 16 p.
10. 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*. 2022. № 2 (14). С. 5–20.
11. Новак С., Пустовий М. Співвідношення необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. № 2 (14). С. 63–74.
12. Gravit M., Dmitriev I., Shcheglov N., Radaev A. Oil and gas structures: Forecasting the fire resistance of steel structures with fire protection under hydrocarbon fire conditions. *Fire*. 2024. Vol. 7. P. 173–196. <https://doi.org/10.3390/fire7060173>.
13. Новак С., Добростан О., Пустовий М. Вплив температурного режиму пожежі на проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 1 (15). С. 18–31.
14. Randaxhe J., Popa N., Vassart O., Tondini N. Development of a plug-and-play fire protection system for steel columns. *Fire Saf. J.* 2021. Vol. 121. P. 103272.
15. Diaconu B., Cruceru M., Angheliescu L. Fire retardance methods and materials for phase change materials: performance, integration methods, and applications — A literature review. *Fire*. 2023. Vol. 6. P. 175.
16. EAD 350402-00-1106 Reactive coatings for fire protection of steel elements. EOTA 2017. 32 p.
17. Fireproofing for hydrocarbon fire exposures//GAPS Guidelines. *Publication of Global Asset Protection Services LLC*. 2000. <https://www.appliedbuildingtech.com/system/files/gap2.5.1.fireproofingforhydrocarbonexposures.pdf>.
18. AXA XL Risk consulting. GAPS© 2020. Available online: <https://axaxl.com/-/media/axaxl/files/pdfs/prc-guidelines/prc-2/prc251fireproofingforhydrocarbonfireexposuresv1.pdf>.
19. Ковальов А., Зобенко Н. Методика попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2016. № 1 (1). С. 59–65.

20. Круковский П., Новак С., Поклонский В., Еременко С., Фролов Г. *Оценка огнестойкости металлических строительных конструкций и огнезащитной способности покрытий (расчетно-экспериментальный подход)*: коллективная монография. Киев: ТОВ "Франко Пак". 2021. 148 с.
21. Пустовий М., Маладика І., Новак С. Оцінювання співвідношення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2024. Том 8, № 2. С. 104–120.
22. ДСТУ Б В.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ) Захист від пожежі. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності. Київ: *Мінрегіонбуд України*. 2008. 65 с.
23. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ: *Мінрегіон України*. 2016. 111 с.
24. Krukovsky P. Concerning a possibility of solution of inverse and optimization heat-transfer and fluid flow problems using PHOENICS and software FRIEND. *The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics & its applications*. 1996. Vol. 9. № 4. P. 516–532.

REFERENCES

1. EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 CEN. 79 p. [in English].
2. Yellow book: Fire protection for structural steel in buildings 4 edition. Association for Specialist Fire Protection. 2013. <https://asfp.org.uk> [in English].
3. Kalafat K., Vakhitova L. *Analiticheskiy obzor sredstv ognезashchiti stalnikh konstruktssii 2021–2022* [Analytical review of fire protection means for steel structures 2021–2022]. *Ukrainskii tsentr stalnogo proizvodstva*. 2022. 200 s. [in Russian].
4. EAD 350140-00-1106 Renderings and rendering kits intended for fire resistant applications. EOTA 2017. 48 p. [in English].
5. EAD 350142-00-1106 Fire protective board, slab and mat products and kits. EOTA 2017. 60 p. [in English].
6. 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. [in English].
7. EN 1363-1:2020 Fire resistance tests – Part 1: General Requirements. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 54 p. [in English].
8. EN 1991-1-2:2002/AC:2013 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. European committee for standardization. Central secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 61 p. [in English].
9. EN 1363-2:1999 Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999. CEN. 16 p. [in English].
10. Novak S., Dobrostan O., Pustovyi M. Vplyv temperaturnoho rezhymu pozhezhi na neobkhdnu minimalnu tovshchynu vohnezakhysnykh pokryttiv dlia stalevykh konstruktssii. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2022. № 2 (14). S. 5–20 [in Ukrainian].
11. Novak S., Pustovyi M. Spivvidnoshennia neobkhdnoi minimalnoi tovshchyny vohnezakhysnykh pokryttiv stalevykh konstruktssii za ryznymy nominalnymy temperaturnymy rezhymamy pozhezhi. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2024. № 2 (14). S. 63–74 [in Ukrainian].
12. Gravit M., Dmitriev I., Shcheglov N., Radaev A. Oil and gas structures: Forecasting the fire resistance of steel structures with fire protection under hydrocarbon fire conditions. *Fire*. 2024. Vol. 7. P. 173–196. <https://doi.org/10.3390/fire7060173> [in English].
13. Novak S., Dobrostan O., Pustovyi M. Vplyv temperaturnoho rezhymu pozhezhi na promizhok chasu zberezhenosti vohnestiikosti stalevykh konstruktssii. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2023. № 1 (15). S. 18–31 [in Ukrainian].
14. Randaxhe J., Popa N., Vassart O., Tondini N. Development of a plug-and-play fire protection system for steel columns. *Fire Saf. J.* 2021. Vol. 121. P. 103272 [in English].
15. Diaconu B., Cruceru M., Angheliescu L. Fire retardance methods and materials for phase change materials: performance, integration methods, and applications — A literature review. *Fire*. 2023. Vol. 6. P. 175 [in English].
16. EAD 350402-00-1106 Reactive coatings for fire protection of steel elements. EOTA 2017. 32 p. [in English].
17. Fireproofing for hydrocarbon fire exposures//GAPS Guidelines. Publication of Global Asset Protection Services LLC. 2000. <https://www.appliedbuildingtech.com/system/files/gap2.5.1.fireproofingforhydrocarbonexposures.pdf> [in English].
18. AXA XL Risk consulting. GAPS© 2020. Available online: <https://axaxl.com/-/media/axaxl/files/pdfs/prc-guidelines/prc-2/prc251fireproofingforhydrocarbonfireexposuresv1.pdf> [in English].
19. Kovalov A., Zobenko N. Metodyka poperednoi otsinky vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttiv dlia stalevykh konstruktssii v umovakh temperaturnoho rezhymu vuhlevodnevoi pozhezhi. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2016. № 1 (1). S. 59–65 [in Ukrainian].
20. Krukovskij P., Novak S., Poklonskij V., Eremenko S., Frolov G. *Oczenka ognestojkosti metallicheskich stroitel'nykh konstrukcij i ognезashhitnoj sposobnosti pokry'tij (raschetno-e'ksperimental'ny'j podkhod)*: kolektivnaya monografiya. Kiev: Izdatel'stvo TOV "Franko Pak". 2021. 148 s. [in Russian].
21. Pustovyi M., Maladyka I., Novak S. Otsiniuvannia spivvidnoshennia neobkhdnoi minimalnoi tovshchyny vohnezakhystu stalevykh konstruktssii za ryznymy nominalnymy temperaturnymy rezhymamy pozhezhi. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2024. Том 8, № 2. С. 104–120 [in Ukrainian].
22. DSTU B V.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ) Zakhyst vid pozhezhi. Vohnezakhysni pokryttia dlia budivelnnykh nesuchykh metalovykh konstruktssii. Metod vyznachennia vohnezakhysnoi zdatnosti. Kyiv: *Minrehionbud Ukrainy*. 2008. 65 s. [in Ukrainian].
23. DSTU-N B V.2.6-211:2016 Proektuvannia stalevykh konstruktssii. Rozrakhunok konstruktssii na vohnestiikist. Kyiv: *Minrehion Ukrainy*. 2016. 111 s. [in Ukrainian].
24. Krukovsky P. Concerning a possibility of solution of inverse and optimization heat-transfer and fluid flow problems using PHOENICS and software FRIEND. *The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics & its applications*. 1996. Vol. 9. № 4. P. 516–532 [in English].

ASSESSMENT OF THE REQUIRED THICKNESS OF FIRE PROTECTION OF STEEL STRUCTURES UNDER CONDITIONAL FIRE SCENARIOS

S. Novak¹, M. Pustovyi², I. Maladyka³

¹*Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

²*National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

³*Cherkasy State Technological University, Ukraine*

KEYWORDS: ANNOTATION

analytical
dependence,
fire protection
material, steel
structure, fire
scenario,
temperature
regime, thermal
properties, fire
protection
thickness

Given the practical significance and lack of certainty of data on the parameters of fire protection systems for steel structures under nominal fire temperature regimes that differ from the standard temperature regime, research aimed at improving and developing methods for assessing the required fire protection thickness of these structures under various conditional fire scenarios is relevant. The conducted study aimed to determine the analytical dependences of the ratio of the values of the required thickness of the fire protection coating for scenarios of a conditional fire under the temperature regimes of hydrocarbon and external fires and its values under the standard temperature regime on the parameters of the steel structure, which are acceptable for engineering calculations.

A research method was applied, the components of which are procedures for numerical modelling of the thermal state of a steel structure under conditional fire scenarios, approximation of the obtained calculated data using regression models, and comparison of calculated values with experimental ones. According to the results of the study, the relationship between the values of the required thickness of the fireproof coating under different scenarios of a conditional fire for different values of the coefficient of thermal conductivity and specific volumetric heat capacity of the fire protection coating, the cross-sectional area coefficient, the critical temperature, and the time interval for maintaining the fire resistance of the steel structure was determined. The influence of steel structure parameters on this ratio has been determined. The obtained calculated data were approximated with respect to the indicated ratios using two linear regression equations (for the scenario with the temperature regime of a hydrocarbon fire and for the scenario with the temperature regime of an external fire). It is shown that the obtained analytical dependencies (regression models) based on the values of the coefficient of determination and Fisher's exact tests are qualitative and adequate. It was established that the obtained analytical dependencies are acceptable for engineering calculations regarding the prediction of the required thickness of passive and reactive fire protection coatings of steel structures for conditional fire scenarios under the temperature regimes of hydrocarbon and external fires.