

УДК 614.841.45

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖІ НА НЕОБХІДНУ МІНІМАЛЬНУ ТОВЩИНУ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.5-20>

Новак С. В.^{1*}, ORCID iD 0000-0001-7087-318X
Добростан О. В.¹, ORCID iD 0000-0001-8908-0729
Пустовий М. М.², ORCID iD 0000-0003-1434-4296
*E-mail: novak.s.fire@gmail.com

¹Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

²Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 11.10.2022

Пройшла рецензування: 14.10.2022

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогнезахисне покриття, коефіцієнт теплопровідності, критична температура сталі, необхідна мінімальна товщина, номінальний температурний режим, сталева конструкція, теплофізичні властивості

АНОТАЦІЯ

Через брак даних щодо співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі, та значеннями цієї товщини для стандартного температурного режиму пожежі відбувається обмеження сфери застосування таких вогнезахисних матеріалів. У проведеному дослідженні ставилося за мету виявлення впливу цих номінальних температурних режимів пожежі на необхідну мінімальну товщину вогнезахисного покриття для таких несучих сталевих конструкцій, як колони і балки, для широких діапазонів змінювання теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції. За розрахунковим методом, який ґрунтується на розв'язуванні прямої одномірної задачі теплопровідності, визначено дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для температурних режимів вуглеводневої та зовнішньої пожежі і дані щодо різниці між цими отриманими значеннями зі значеннями такої товщини, встановленими для стандартного температурного режиму. З'ясовано, що різниця між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, і значеннями цієї товщини, визначеними за стандартного температурного режиму, має позитивні значення (від 5,74% до 214%), водночас для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі – від'ємні (від -7,52% до -64,7%). Ця різниця як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі, з підвищенням коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу, коефіцієнта поперечного перерізу і зі зменшенням критичної температури сталі зменшується. Закономірним є те, що з підвищенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції для температурного режиму вуглеводневої пожежі різниця між товщинами зменшується, а для температурного режиму зовнішньої пожежі – збільшується (за модулем).

Постановка проблеми. Згідно з положеннями Будівельного Єврокоду № 3 [1] для забезпечення вогнестійкості несучих сталевих конструкцій, таких як колони і балки (далі – сталевих конструкцій), товщина їхнього вогнезахисту має бути такою, щоб в умовах вогневого впливу температура цих конструкцій θ_a не перевищувала критичного значення $\theta_{a,cr}$. Для оцінювання цієї товщини застосовують методи випробування [2; 3], які ґрунтуються на сценарії умовної пожежі та вогневому впливі за стандартного температурного режиму. За цими методами визначають значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття $d_{p,min}$, необхідні для забезпечення вогнестійкості сталевих конструкцій протягом нормованих проміжків часу вогневого впливу t_{fr} за стандартного температурного режиму. За результатами таких випробувань визначено дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів різних торговельних марок, деякі з яких наведено в [4].

Водночас відповідно до положень Єврокодів № 1 [5] і № 3 [1] для

оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій, крім стандартного температурного режиму, можуть застосовуватись інші номінальні (нормовані) температурні режими, такі як режим вуглеводневої пожежі і режим зовнішньої пожежі. Серед цих номінальних режимів температурний режим вуглеводневої пожежі є найбільш жорстким і стосується пожеж на нафтопереробних підприємствах або у транспортних тунелях, де наявність великої кількості горючих рідин призводить до різкого зростання температури газового середовища вже у перші хвилини пожежі (табл. 1). Температурний режим зовнішньої пожежі, який є менш інтенсивним, ніж стандартний температурний режим (табл. 1), використовують для зовнішніх конструкцій будівель, компонентами яких можуть бути сталеві конструкції. Цей температурний режим моделює вплив на зовнішню конструкцію вогню, що може виходити з вікна будівлі, або від пожежі ззовні, що відбувається в режимі вільного горіння [6].

Таблиця 1 – Температура газового середовища для номінальних температурних режимів залежно від тривалості пожежі

Тривалість номінальної пожежі t , хв	Температура газового середовища θ_g (°C) для:		
	стандартного температурного режиму	режиму вуглеводневої пожежі	режиму зовнішньої пожежі
0	20	20	20
5	576	948	588
10	678	1034	662
15	739	1071	676
30	842	1098	680
45	902	1100	680
60	945	1100	680
90	1006	1100	680
120	1049	1100	680
150	1082	1100	680
180	1110	1100	680
240	1153	1100	680

Якщо для більшості вогнезахисних покриттів, застосованих для сталевих конструкцій, наявні дані щодо їхньої необхідної мінімальної товщини, визначені

для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму, то таких даних немає для умов вогневого впливу, які відповідають іншим номінальним

температурним режимам. Через брак таких даних обмежується сфера застосування вогнезахисних матеріалів, призначених для вогнезахисту сталевих конструкцій, і немає можливості проводити оптимізацію параметрів систем вогнезахисту для умов вогневого впливу, які відрізняються від стандартного температурного режиму. Зважаючи на необхідність розширення сфери застосування вогнезахисних матеріалів для сталевих конструкцій і проведення оптимізації їх вогнезахисту для подальшого удосконалення й розвитку технології вогнезахисту цих конструкцій, актуальним слід вважати дослідження, спрямоване на виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на необхідну мінімальну товщину вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій виконують із застосуванням сценаріїв умовної або реальної пожежі. Для сценарію умовної пожежі використовують номінальні температурні режими, серед яких найбільш застосовним є стандартний температурний режим [1]. Для умов вогневого впливу, які відповідають стандартному температурному режиму, здійснюють класифікацію сталевих конструкцій за вогнестійкістю, а також визначають товщину вогнезахисту, яка має бути для забезпечення нормованої вогнестійкості сталевих конструкцій, застосовуваних усередині будівель [6–7].

У роботі [4] наведено експериментальні дані щодо значення цієї товщини для пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів, призначених для вогнезахисту сталевих конструкцій, які отримано для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму та надано у табличній формі відповідно до положень EN 13381-4:2013 [2] і EN 13381-8:2013 [3]. Водночас значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття $d_{p,min}$ наведено для різних величин критичної температури сталі θ_{cr} , коефіцієнта поперечного перерізу

A_m/V і проміжку часу збереженості вогнестійкості t_f сталевій конструкції. З аналізу наведених у роботі [4] даних випливає наявність різниці у значеннях товщини $d_{p,min}$ для вогнезахисних матеріалів різних торговельних марок, що може бути зумовлено відмінністю в їхніх теплофізичних властивостях.

Розрахункові залежності між необхідною мінімальною товщиною систем вогнезахисту $d_{p,min}$ для сталевих конструкцій з вогнезахисним екраном і без нього, теплофізичними властивостями вогнезахисних матеріалів, які є компонентами цих систем вогнезахисту, критичною температурою сталі θ_{cr} , коефіцієнтом поперечного перерізу A_m/V і проміжком часу t_f наведено в роботі [8]. Ці залежності також отримано для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму. В цій роботі показано, що значення товщини вогнезахисту $d_{p,min}$ для цих систем суттєво залежить від коефіцієнта теплопровідності застосованих вогнезахисних матеріалів λ_p , коефіцієнта поперечного перерізу A_m/V , критичної температури сталі θ_{cr} і проміжку часу t_{fr} (з підвищенням λ_p , A_m/V , t_{fr} і зменшенням θ_{cr} товщина $d_{p,min}$ збільшується).

У роботі [9] наведено залежності проміжків часу досягнення різної критичної температури сталі ($\theta_{cr} = 450$ °C, 500 °C, 550 °C, 600 °C) від коефіцієнта поперечного перерізу A_m/V для незахищених сталевих конструкцій для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму і за режиму вуглеводневої пожежі. З наведених у цій роботі даних випливає, що для сталевих конструкцій, неоснащених вогнезахистом, ці проміжки часу для температурного режиму вуглеводневої пожежі на (45–60) % менші, ніж для стандартного температурного режиму. Також для цих двох номінальних температурних режимів пожежі наведено залежності проміжку часу $t_{f,500}$ досягнення критичної температури сталі $\theta_{cr} = 500$ °C від коефіцієнта поперечного перерізу A_m/V для сталевих конструкцій, оснащених

вогнезахисними покриттями з піщано-цементної штукатурки та матеріалу «Ньюспрей». З аналізу цих залежностей випливає, що для зазначених захищених сталевих конструкцій проміжок часу $t_{f,500}$ менший на (17–59) % для температурного режиму вуглеводневої пожежі, ніж для стандартного температурного режиму. Водночас ця різниця менша для вогнезахисного покриття з піщано-цементної штукатурки, ніж для вогнезахисного покриття з матеріалу «Ньюспрей», і підвищується зі збільшенням коефіцієнта поперечного перерізу A_m/V та товщини вогнезахисного покриття.

Питання щодо співвідношення між значеннями товщини $d_{p,min}$ для сталевих конструкцій, необхідними для забезпечення вогнестійкості в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму і за режиму вуглеводневої пожежі, розглянуто в [10]. За результатами проведеного в цій роботі дослідження встановлено, що для сталевих конструкцій з вогнезахисним покриттям з матеріалу «Amotherm Steel Wb», що спучується, для критичної температури сталі, яка становить 500 °С, і проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_f = 30$ хв значення необхідної мінімальної товщини цього вогнезахисного покриття для вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі приблизно удвічі більші, ніж для стандартного температурного режиму.

Наведені вище результати досліджень дають змогу обґрунтовано підходити до визначення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту сталевих конструкцій для сценарію умовної пожежі у разі вогневого впливу за стандартного температурного режиму. В цих дослідженнях для зазначеного вогневого впливу наведено залежності між необхідною мінімальною товщиною вогнезахисту і параметрами різних систем вогнезахисту, а також дані щодо значення цієї товщини для сталевих конструкцій, оснащених конкретними типами вогнезахисних матеріалів. Однак в їх

результатах бракує залежностей і даних щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисту для сталевих конструкцій, які стосуються вогневого впливу за іншими номінальними температурними режимами, а також даних щодо співвідношення значень цієї товщини, отриманих за різними номінальними режимами. Така невизначеність щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисту для сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі зумовила проведення дослідження в цьому напрямі.

Формулювання цілей дослідження. За мету дослідження ставилось виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на необхідну мінімальну товщину вогнезахисного покриття для таких несучих сталевих конструкцій, як колони і балки, для широких діапазонів змінювання теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції.

Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання:

- визначити залежності необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій від теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі;

- визначити різницю між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі, і значеннями такої товщини, встановленими за стандартного температурного режиму;

- визначити залежності цієї різниці

від теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу та проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції.

Методи дослідження. Застосовано метод дослідження, складовими якого є обчислювальні процедури чисельного моделювання теплового стану сталевих конструкцій, оснащених вогнезахисним матеріалом із заданими теплофізичними властивостями, в умовах вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожеж, операції аналізу, порівняння, узагальнення та систематизації отриманих розрахункових даних. Для розрахунку теплового стану захищених сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу використано одомірну двошарову математичну модель теплопровідності, яка складається із системи рівнянь, наведену в [8]. Значення коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією і теплового випромінювання на обігрівній поверхні вогнезахисного покриття, теплофізичні властивості сталі та інші параметри цієї моделі обрані такими, як наведено у [5; 11]. Розв'язання математичної моделі виконано методом кінцевих різниць за неявною схемою апроксимації із використанням пакету прикладних програм FRIEND [12].

Виклад основного матеріалу. Для визначення залежності необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття від теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу та проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожеж використано процедуру, основні положення якої взято з роботи [8].

Відповідно до цієї процедури для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі через багаторазове розв'язування прямої задачі теплопровідності визначали дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття $d_{p,min,HC}$, за якої для тривалості вогневого впливу, що відповідає проміжку часу збереженості вогнестійкості t_{fr} , розрахункова температура сталевій конструкції $\theta_{a,cal}$ із коефіцієнтом поперечного перерізу A_m/V дорівнює критичній температурі сталі θ_{cr} .

Розрахунки товщини $d_{p,min,HC}$ проводили для всіх комбінацій значень коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного 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)), критичної температури сталі ($\theta_{cr,min} = 350$ °C; $\theta_{cr,med} = 500$ °C; $\theta_{cr,max} = 700$ °C), коефіцієнта поперечного перерізу ($(A_m/V)_{min} = 40$ м⁻¹; $(A_m/V)_{med} = 150$ м⁻¹; $(A_m/V)_{max} = 300$ м⁻¹) і проміжку часу збереженості вогнестійкості ($t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв) сталевій конструкції. Загальна кількість цих комбінацій становила 81. Питому теплоємність вогнезахисного матеріалу брали сталою і рівною $c_p \rho_p = 500$ кДж/(м³·°C) ($c_p = 1000$ Дж/(кг·°C), $\rho_p = 500$ кг/м³) [8].

Таким же чином визначали дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття $d_{p,min,ef}$ для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі, за винятком того, що розрахунки не проводили для критичної температури сталі $\theta_{cr,max} = 700$ °C. Це пов'язано з тим, що для цього режиму сталева конструкція не може досягнути температури 700 °C через те, що вона більша за максимальне значення температури газового середовища θ_g , яке складає 680 °C (табл. 1). Результати розрахунків товщини $d_{p,min,HC}$ і $d_{p,min,ef}$ наведено в табл. 2, 3.

Таблиця 2 – Результати розрахунків товщини $d_{p,min,HC}$

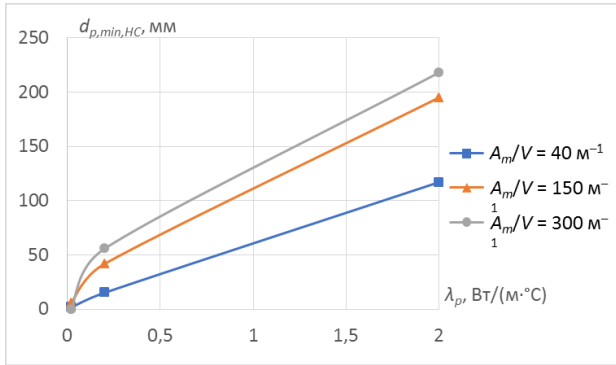
A_m/V , m^{-1}	λ_p , Вт/(м·°С)	Товщина $d_{p,min,HC}$ (в мм) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	0,85	0,47	0,21	2,76	1,58	0,78	7,39	4,32	2,19
150	0,02	3,15	1,84	0,91	9,28	5,71	2,98	21,8	14,3	7,87
300	0,02	5,68	3,52	1,82	14,8	10,0	5,65	30,7	22,4	13,8
40	0,2	8,22	4,61	2,09	25,3	15,2	7,71	61,4	39,3	21,0
150	0,2	24,2	15,9	8,53	57,7	41,8	25,4	112	86,4	57,9
300	0,2	33,6	24,6	15,1	71,2	55,8	38,5	129	105	77,1
40	2,0	65,3	40,6	19,8	167	117	67,9	335	253	164
150	2,0	118	90,5	59,6	242	195	142	429	354	270
300	2,0	136	109	79,4	263	218	168	452	379	299

Таблиця 3 – Результати розрахунків товщини $d_{p,min,ef}$

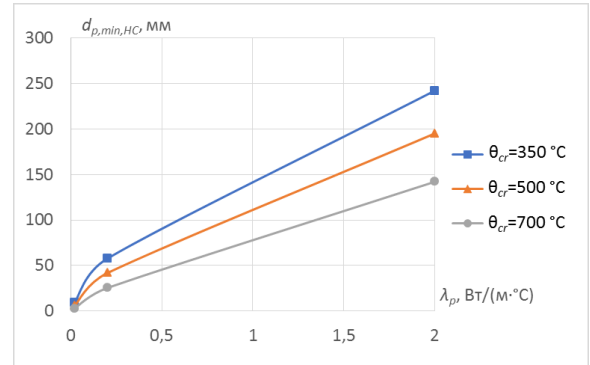
A_m/V , m^{-1}	λ_p , Вт/(м·°С)	Товщина $d_{p,min,ef}$ (в мм) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	0,32	0,06	–	1,35	0,60	–	3,83	1,83	–
150	0,02	1,58	0,71	–	5,11	2,52	–	13,0	6,83	–
300	0,02	3,12	1,52	–	9,13	4,88	–	20,7	12,2	–
40	0,2	3,14	0,60	–	12,9	5,84	–	35,1	17,6	–
150	0,2	13,6	6,59	–	37,9	21,6	–	79,9	50,8	–
300	0,2	21,9	12,5	–	51,4	33,6	–	97,6	68,4	–
40	2,0	26,9	5,30	–	99,3	50,8	–	227	137	–
150	2,0	75,4	43,9	–	175	119	–	325	235	–
300	2,0	93,4	62,2	–	197	142	–	349	261	–

Із аналізу цих даних випливає, що як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі необхідна мінімальна товщина вогнезахисного покриття збільшується із підвищенням коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу λ_p , коефіцієнта поперечного перерізу A_m/V , проміжку часу збереженості вогнестійкості t_{fr} і зі зменшенням критичної температури сталі θ_{cr} . Зокрема, для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі за $\theta_{cr,med} = 500$ °С, $t_{fr,med} = 90$ хв і підвищення λ_p від 0,02 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) товщина $d_{p,min,HC}$ збільшується: від 1,58 мм до 117 мм – для $(A_m/V)_{min} = 40$ м⁻¹; від 5,71 мм до 195 мм – для $(A_m/V)_{med} = 150$ м⁻¹; від 10,0 мм до 218 мм – для $(A_m/V)_{max} = 300$ м⁻¹ (рис. 1а).

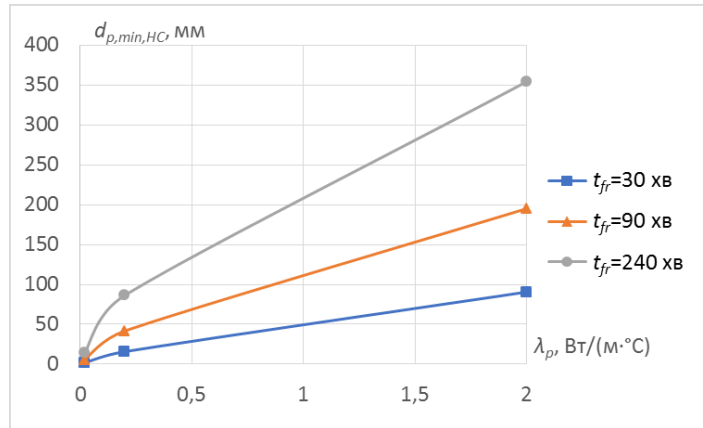
У разі $(A_m/V)_{med} = 150$ м⁻¹, $t_{fr,med} = 90$ хв і підвищення λ_p від 0,02 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) товщина $d_{p,min,HC}$ збільшується: від 9,28 мм до 242 мм – для $\theta_{cr,min} = 350$ °С; від 5,71 мм до 195 мм – для $\theta_{cr,med} = 500$ °С; від 2,98 мм до 142 мм – для $\theta_{cr,max} = 700$ °С (рис. 1б). За $(A_m/V)_{med} = 150$ м⁻¹, $\theta_{cr,med} = 500$ °С і підвищення λ_p від 0,02 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) товщина $d_{p,min,HC}$ збільшується: від 1,84 мм до 90,5 мм – для $t_{fr,min} = 30$ хв; від 5,71 мм до 195 мм – для $t_{fr,med} = 90$ хв; від 14,3 мм до 354 мм – для $t_{fr,max} = 240$ хв (рис. 1в). Діапазон значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі складає від 0,21 мм до 452 мм, і він є ширшим, ніж для режиму зовнішньої пожежі, для якого цей діапазон складає від 0,06 мм до 349 мм.



а



б



в

Рисунок 1 – Залежності товщини $d_{p,min,HC}$ від коефіцієнта теплопровідності λ_p і коефіцієнта поперечного перерізу (а), критичної температури сталі (б), проміжку часу збереженості вогнестійкості (в) для $\theta_{cr,med} = 500^\circ\text{C}$, $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$, $t_{fr,med} = 90 \text{ хв}$

Дані щодо різниці між наведеними в табл. 2, 3 значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі, та значеннями цієї товщини, визначеними за стандартного температурного режиму (див. табл. 4 [8]), вказано в табл. 5, 6. Цю різницю розраховували за такими формулами:

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

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

де $\delta_{d,HC}$ – різниця між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття, отриманими для умов вогневого впливу за температурного

режиму вуглеводневої пожежі та за стандартного температурного режиму, %;

$\delta_{d,ef}$ – різниця між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття, отриманими для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі та за стандартного температурного режиму, %;

$d_{p,min,HC}$ і $d_{p,min,ef}$ – значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття, що отримані для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі та за температурного режиму зовнішньої пожежі й наведені в табл. 1, 2, мм;

$d_{p,min}$ – значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття, що отримані для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму та наведені в табл. 4 [8], мм.

Таблиця 4 – Дані щодо товщини $d_{p,min}$, що отримані для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму [8]

A_m/V , М ⁻¹	λ_p , Вт/(М·°С)	Товщина $d_{p,min}$ (у мм) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	0,44	0,17	–	2,07	1,13	0,49	6,75	3,94	1,98
150	0,02	1,89	0,96	0,29	7,28	4,26	1,99	20,2	13,2	7,15
300	0,02	3,64	1,97	0,68	12,1	7,74	3,90	28,7	20,8	12,7
40	0,2	4,25	1,64	–	19,4	11,1	4,83	56,5	35,9	19,1
150	0,2	15,8	8,78	2,80	48,1	33,0	17,8	105	80,4	53,2
300	0,2	24,3	15,4	6,20	61,3	46,1	28,8	122	98,1	71,5
40	2,0	35,4	14,8	–	135	88,0	43,8	311	233	149
150	2,0	83,6	55,3	22,3	208	161	108	404	331	251
300	2,0	101	73,3	38,5	229	184	132	427	356	279

Таблиця 5 – Дані щодо різниці $\delta_{d,HC}$

A_m/V , М ⁻¹	λ_p , Вт/(М·°С)	Значення $\delta_{d,HC}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	93,2	176	–	33,3	39,8	59,2	9,48	9,64	10,6
150	0,02	66,7	91,7	214	27,5	34,0	49,8	7,92	8,33	10,1
300	0,02	56,0	78,7	168	22,3	29,2	44,9	6,97	7,69	8,66
40	0,2	93,4	181	–	30,4	36,9	59,6	8,67	9,47	9,95
150	0,2	53,2	81,1	204	20,0	26,7	42,7	6,67	7,46	8,83
300	0,2	38,3	59,7	144	16,2	21,0	33,7	5,74	7,03	7,83
40	2,0	84,5	174	–	23,7	33,0	55,0	7,72	8,58	10,1
150	2,0	41,2	63,7	167	16,4	21,1	31,5	6,19	6,95	7,57
300	2,0	34,7	48,7	106	14,9	18,5	27,3	5,85	6,46	7,17

Таблиця 6 – Дані щодо різниці $\delta_{d,ef}$

A_m/V , М ⁻¹	λ_p , Вт/(М·°С)	Значення $\delta_{d,ef}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	-27,3	-64,7	–	-34,8	-46,9	–	-43,3	-53,6	–
150	0,02	-16,4	-26,0	–	-29,8	-40,9	–	-35,6	-48,3	–
300	0,02	-14,3	-22,8	–	-24,6	-37,0	–	-27,9	-41,4	–
40	0,2	-26,1	-63,4	–	-33,5	-47,4	–	-37,9	-51,0	–
150	0,2	-13,9	-24,9	–	-21,2	-34,6	–	-23,9	-36,8	–
300	0,2	-9,88	-18,8	–	-16,2	-27,1	–	-20,0	-30,3	–
40	2,0	-24,0	-64,2	–	-26,4	-42,3	–	-27,0	-41,2	–
150	2,0	-9,81	-20,6	–	-15,9	-26,1	–	-19,6	-29,0	–
300	2,0	-7,52	-15,1	–	-14,0	-22,8	–	-18,3	-26,7	–

Із аналізу даних, наведених у табл. 5, випливає, що різниця $\delta_{d,HC}$ між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі і за стандартного температурного режиму, залежить від коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу λ_p , коефіцієнта поперечного перерізу A_m/V , критичної температури сталі θ_{cr} і проміжку

часу збереженості вогнестійкості t_{fr} та змінюється в діапазоні від 5,74 % до 214 %. З підвищенням λ_p , A_m/V , t_{fr} і зі зменшенням θ_{cr} різниця $\delta_{d,HC}$ зменшується. Найбільший вплив на її величину має значення проміжку часу t_{fr} . Найбільші значення (від 34,7 % до 214 %) різниця $\delta_{d,HC}$ має для проміжку часу t_{fr} , який складає 30 хв, найменші (від 5,74 % до 10,6 %) – для 240 хв. Вплив коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу λ_p , коефіцієнта

поперечного перерізу A_m/V і критичної температури θ_{cr} на різницю $\delta_{d,HC}$ є значним для проміжку часу $t_{fr,min} = 30$ хв, а з підвищенням цього проміжку часу він слабкішає. Зокрема, за $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$, $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ і підвищення проміжку часу t_{fr} від 30 хв до 240 хв різниця $\delta_{d,HC}$ зменшується: від 91,7 % до 8,33 % – для $\lambda_p = 0,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$; від 81,1 % до 7,46 % – для $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$; від 63,7 % до 6,95 % – для $\lambda_p = 2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$ (рис. 2а). За $t_{fr,min} = 30$ хв, $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ і підвищення коефіцієнта поперечного

перерізу A_m/V від 40 м^{-1} до 300 м^{-1} різниця $\delta_{d,HC}$ зменшується: від 176 % до 78,7 % – для $\lambda_p = 0,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$; від 181 % до 59,7 % – для $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$; від 174 % до 48,7 % – для $\lambda_p = 2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$ (рис. 2б). За $t_{fr,min} = 30$ хв, $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$ і підвищення критичної температури сталі θ_{cr} від $350 \text{ }^\circ\text{C}$ до $700 \text{ }^\circ\text{C}$ різниця $\delta_{d,HC}$ збільшується: від 66,7 % до 214 % – для $\lambda_p = 0,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$; від 53,2 % до 205 % – для $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$; від 41,2 % до 167 % – для $\lambda_p = 2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$ (рис. 2в).

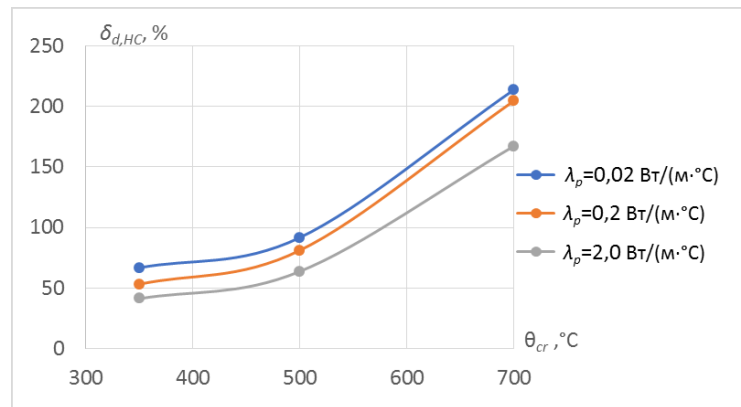
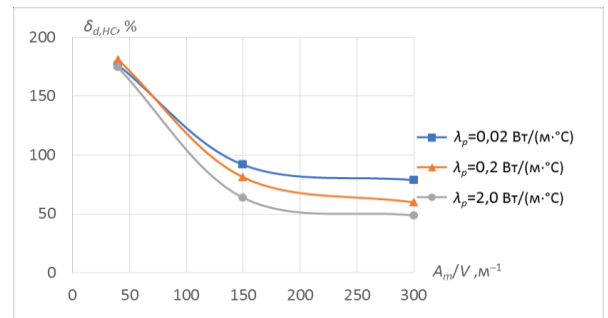
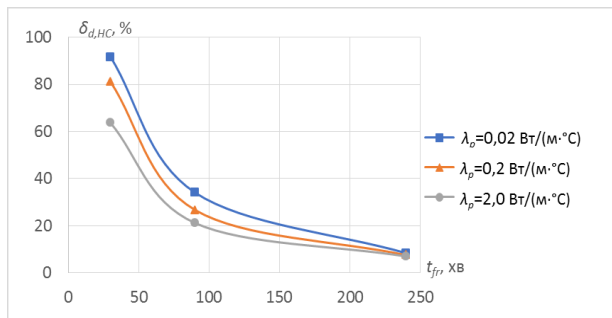


Рисунок 2 – Залежності різниці $\delta_{d,HC}$ від проміжку часу t_{fr} (а), коефіцієнта поперечного перерізу A_m/V (б), критичної температури сталі θ_{cr} (в) для різних значень коефіцієнта теплопровідності λ_p

Із аналізу даних, наведених у табл. 6, випливає, що різниця $\delta_{d,ef}$ між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі і за стандартного температурного режиму, також як і різниця $\delta_{d,HC}$ залежить від коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу λ_p , коефіцієнта поперечного перерізу A_m/V , критичної температури сталі θ_{cr} та проміжку часу

збереженості вогнестійкості t_{fr} і змінюється в діапазоні від -7,52 % до -64,7 %. З підвищенням λ_p , A_m/V і зі зменшенням θ_{cr} різниця $\delta_{d,ef}$ (за модулем) зменшується. Зокрема, за $t_{fr,med} = 90$ хв, $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ і підвищення коефіцієнта поперечного перерізу A_m/V від 40 м^{-1} до 300 м^{-1} різниця $\delta_{d,ef}$ зменшується: від -46,9 % до -37,0 % – для $\lambda_p = 0,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$; від -47,4 % до -27,1 % – для $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$; від -42,3 % до -22,8 % – для $\lambda_p = 2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$ (рис. 3а). За $t_{fr,med} = 90$ хв, $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$ і

підвищення критичної температури сталі θ_{cr} від 350 °C до 500 °C різниця $\delta_{d,ef}$ збільшується: від -29,8 % до -40,9, % – для $\lambda_p = 0,02$ Вт/(м·°C); від -21,2 % до -34,6 % – для $\lambda_p = 0,2$ Вт/(м·°C); від -15,9 % до -26,1, % – для $\lambda_p = 2,0$ Вт/(м·°C) (рис. 3б). Водночас залежність різниці $\delta_{d,ef}$ від проміжку часу t_{fr} є неоднозначною. За $(A_m/V)_{min} = 40$ м⁻¹ і $\theta_{cr,med} = 500$ °C з підвищенням t_{fr} від 30 хв до 90 хв різниця зменшується, а потім збільшується

(крім варіанту з $\lambda_p = 2,0$ Вт/(м·°C)). Для інших комбінацій A_m/V і θ_{cr} різниця $\delta_{d,ef}$ збільшується з підвищенням t_{fr} . Зокрема, за $(A_m/V)_{med} = 150$ м⁻¹, $\theta_{cr,med} = 500$ °C і підвищення проміжку часу t_{fr} від 30 хв до 240 хв різниця $\delta_{d,ef}$ збільшується: від -26,0 % до -48,3 % – для $\lambda_p = 0,02$ Вт/(м·°C); від -24,9 % до -36,8 % – для $\lambda_p = 0,2$ Вт/(м·°C); від -20,6 % до -29,0 % – для $\lambda_p = 2,0$ Вт/(м·°C) (рис. 3в).

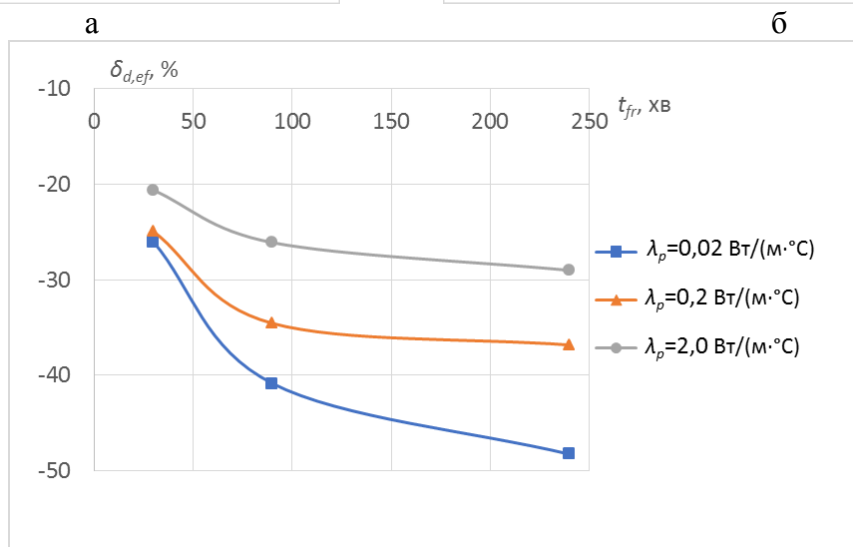
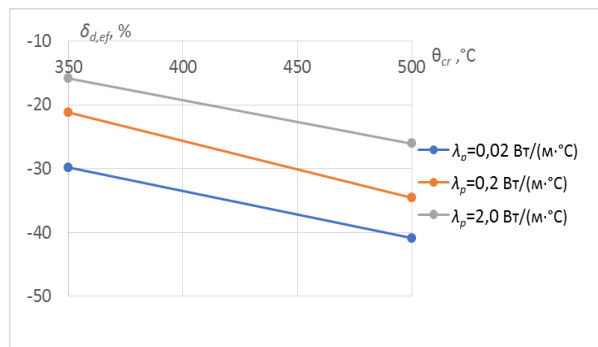
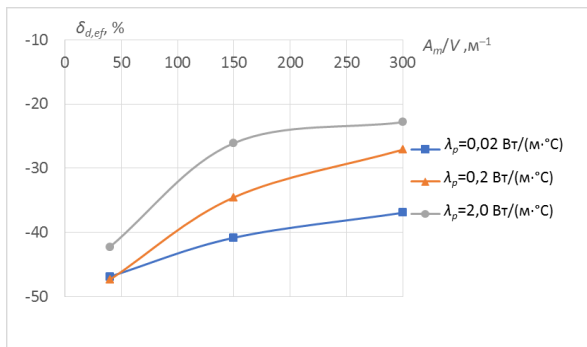


Рисунок 3 – Залежності різниці $\delta_{d,ef}$ від коефіцієнта поперечного перерізу A_m/V (а), критичної температури сталі θ_{cr} (б), проміжку часу t_{fr} (в) для різних значень коефіцієнта теплопровідності λ_p

Отримані дані щодо різниці між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, встановленими для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі, та значеннями такої товщини, визначеними за стандартного температурного режиму, які наведено в табл. 5, 6, дають змогу стверджувати таке:

– ця різниця для умов вогневого

впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі має позитивні значення, а для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі – від’ємні (необхідна мінімальна товщина вогнезахисного покриття для температурного режиму вуглеводневої пожежі більша, ніж для стандартного температурного режиму, а для температурного режиму зовнішньої пожежі – менша);

– ця різниця як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі з підвищенням коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу λ_p , коефіцієнта поперечного перерізу A_m/V та зі зменшенням критичної температури сталі θ_{cr} зменшується. Для температурного режиму вуглеводневої пожежі вплив λ_p , A_m/V і θ_{cr} на різницю $\delta_{d,HC}$ є значним для проміжку часу $t_{fr,min} = 30$ хв, а з підвищенням цього проміжку він слабкішає. Для температурного режиму зовнішньої пожежі залежності інтенсивності впливу λ_p , A_m/V і θ_{cr} на різницю $\delta_{d,ef}$ від проміжку часу t_{fr} не спостерігається;

– ця різниця як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі значно залежить від проміжку часу збереженості вогнестійкості t_{fr} . Закономірним є те, що з підвищенням цього проміжку часу для температурного режиму вуглеводневої пожежі вона зменшується, а для температурного режиму зовнішньої пожежі – збільшується. Це зумовлено відмінністю у рівнях теплового впливу на захищену сталеву конструкцію, які мають місце в умовах різних номінальних температурних режимів. Цей рівень визначається тепловим потоком на обігрівній поверхні конструкції (на зовнішній поверхні вогнезахисного покриття), величина якого залежить від температури газового середовища θ_g (°C), і тривалістю вогневого впливу. Кількість теплоти, яка надходить до конструкції протягом певного проміжку часу вогневого впливу, прямо пропорційна площі під залежністю температури

газового середовища θ_g від тривалості номінальної пожежі t . У табл. 7 наведено дані щодо площі під залежністю температури газового середовища θ_g від тривалості номінальної пожежі t (табл. 1), отримані за формулою (Г. 2) ДСТУ [13] для стандартного температурного режиму (A_S), температурного режиму вуглеводневої пожежі (A_{HC}) і температурного режиму зовнішньої пожежі (A_{ef}), а також дані щодо співвідношення цих площ, які визначено за такими формулами:

$$\delta_{A,HC} = 100(A_{HC} - A_S)/A_S; \quad (3)$$

$$\delta_{A,ef} = 100(A_{ef} - A_S)/A_S, \quad (4)$$

де $\delta_{A,HC}$ – різниця між площами під залежностями температури газового середовища θ_g від тривалості номінальної пожежі, отриманими для температурного режиму вуглеводневої пожежі та для стандартного температурного режиму, %;

$\delta_{A,ef}$ – різниця між площами під залежностями температури газового середовища θ_g від тривалості номінальної пожежі, отриманими для температурного режиму зовнішньої пожежі та для стандартного температурного режиму, %;

A_{HC} – площа під залежністю температури газового середовища θ_g від тривалості номінальної пожежі для температурного режиму вуглеводневої пожежі, °C·хв;

A_{ef} – площа під залежністю температури газового середовища θ_g від тривалості номінальної пожежі для температурного режиму зовнішньої пожежі, °C·хв;

A_S – площа під залежністю температури газового середовища θ_g від тривалості номінальної пожежі для стандартного температурного режиму, °C·хв.

Таблиця 7 – Площі під залежністю $\theta_g(t)$ для номінальних температурних режимів пожежі, а також їхнє співвідношення

Тривалість номінальної пожежі t , хв	Площа ($у \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{хв}$) для:			Різниця між площами ($у \%$):	
	стандартного температурного режиму, A_S	температурного режиму вуглеводневої пожежі, A_{HC}	температурного режиму зовнішньої пожежі, A_{ef}	$\delta_{A,HC}$	$\delta_{A,ef}$
5	1490	2420	1520	62,4	2,0
10	4625	7375	4645	59,5	0,4
15	8168	12638	7990	54,7	-2,2
30	20025	28905	18160	44,3	-9,3
45	33105	45390	28360	37,1	-14,3
60	46958	61890	38560	31,8	-17,9
90	76223	94890	58960	24,5	-22,7
120	107048	127890	79360	19,5	-25,9
150	139013	160890	99760	15,7	-28,2
180	171893	193890	120160	12,8	-30,1
240	239783	259890	160960	8,4	-32,9

З аналізу даних, наведених у табл. 7, і рис. 4 випливає, що площа A_{HC} під залежністю $\theta_g(t)$ для температурного режиму вуглеводневої пожежі більша за площу A_S для стандартного температурного режиму, і з підвищенням тривалості пожежі від 5 хв до 240 хв різниця $\delta_{A,HC}$ монотонно зменшується від 62,4 % до 8,4 %. Значення $\delta_{A,HC}$ для проміжку часу $t_{fr,min} = 30$ хв у 1,8 раза більше, ніж для $t_{fr,med} = 90$ хв і у 5,3 раза більше ніж для $t_{fr,max} = 240$ хв. Через наявність такої значної різниці у величині $\delta_{A,HC}$ для $t_{fr,min}$, $t_{fr,med}$, $t_{fr,max}$ рівень теплового впливу на захищену сталеву конструкцію під час вогневодневої пожежі порівняно з пожежею за стандартного температурного режиму значно більший для її тривалості 30 хв, ніж для тривалостей 90 хв і 240 хв. З огляду на вказане різниця $\delta_{d,HC}$ між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, встановленими для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, і значеннями такої товщини, визначеними за стандартного температурного режиму, має найбільші величини для проміжку часу $t_{fr,min} = 30$ хв, а найменші – для $t_{fr,max} = 240$ хв. Для температурного режиму

зовнішньої пожежі площа A_{ef} під залежністю $\theta_g(t)$ для тривалості пожежі до 11 хв більша, ніж площа A_S для стандартного температурного режиму, а для іншої тривалості – менша. З підвищенням тривалості пожежі від 5 хв до 240 хв різниця $\delta_{A,ef}$ монотонно змінюється від 2,0% до -32,9 %. Значення $\delta_{A,ef}$ (за модулем) для проміжку часу $t_{fr,max} = 240$ хв у 1,4 раза більше, ніж для $t_{fr,med} = 90$ хв і у 3,5 раза більше, ніж для $t_{fr,min} = 30$ хв. Через наявність такої значної різниці у величині $\delta_{A,ef}$ для $t_{fr,min}$, $t_{fr,med}$, $t_{fr,max}$ рівень теплового впливу на захищену сталеву конструкцію під час зовнішньої пожежі порівняно з пожежею за стандартного температурного режиму значно менший для її тривалості 240 хв, ніж для тривалостей 90 хв і 30 хв. Тому різниця $\delta_{d,ef}$ між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, встановленими для умов вогневого впливу за температурним режимом зовнішньої пожежі, і значеннями такої товщини, визначеними за стандартного температурного режиму, має найбільші величини (за модулем) для проміжку часу $t_{fr,max} = 240$ хв, а найменші – для $t_{fr,min} = 30$ хв.

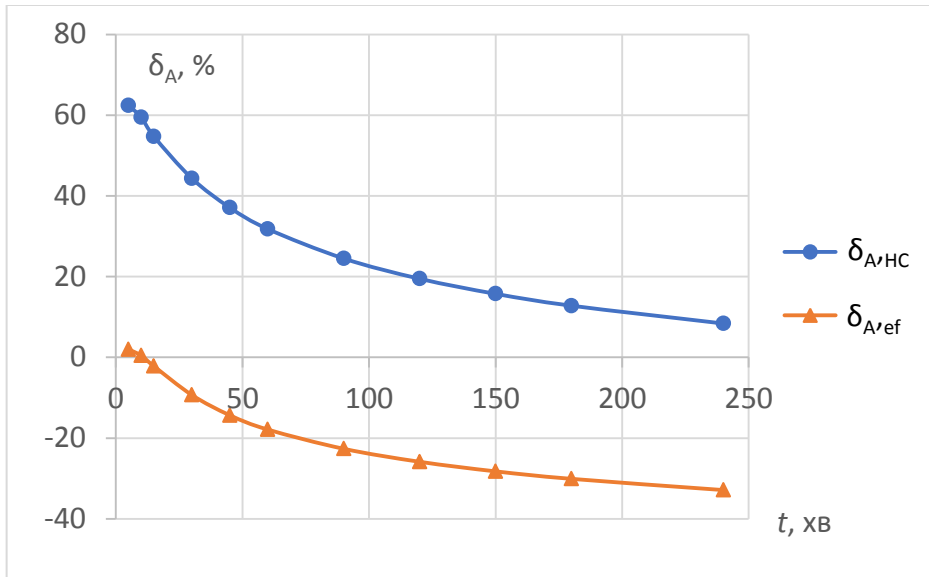


Рисунок 4 – Залежності різниць між площами $\delta_{A,HC}$, $\delta_{A,ref}$ від тривалості номінальної пожежі

Такі висновки можуть вважатися за доцільні з погляду практики, тому що дають змогу обґрунтовано підходити до оцінювання товщини вогнезахисту сталевих конструкцій для умов вогневого впливу у разі інших номінальних температурних режимів, які відрізнятимуться від стандартного. З погляду теорії вони надають можливість стверджувати про визначеність впливу номінальних температурних режимів пожежі на необхідну мінімальну товщину вогнезахисного покриття для таких несучих сталевих конструкцій, як колони і балки, що є певними перевагами проведеного дослідження. Однак варто відзначити, що результати дослідження отримано для вогнезахисного матеріалу, що має сталі, незалежні від температури значення коефіцієнта теплопровідності, а також певну величину питомої теплоємності $c_p = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ і густини $\rho_p = 500 \text{ кг}/\text{м}^3$. Насправді значення коефіцієнта теплопровідності пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів залежать від низки параметрів, зокрема від температури, а їх густина змінюється в широкому діапазоні [7; 14]. Крім того, результати дослідження отримано тільки для системи вогнезахисту без вогнезахисного екрана. Зазначене може призвести до наявності відмінностей в

отриманих результатах стосовно товщини вогнезахисту сталевих конструкцій для умов вогневого впливу у разі інших номінальних температурних режимів, які відрізнятимуться від стандартного.

Така невизначеність накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися, як недоліки цього дослідження. Неможливість зняття цих умов у межах зазначеного дослідження породжує потенційно цікавий напрям подальших розвідок. Вони, зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на необхідну мінімальну товщину різних систем вогнезахисту для сталевих конструкцій, в яких застосовуються вогнезахисні матеріали зі змінним коефіцієнтом теплопровідності та різною густиною, а також вогнезахисні екрани. Таке виявлення дасть змогу оцінити оптимальні параметри різних систем вогнезахисту для сталевих конструкцій, що прийнятні для забезпечення їхньої вогнестійкості в широкому діапазоні тривалості вогневого впливу за різними номінальними температурними режимами.

Висновки та напрями подальших досліджень. Під час проведення дослідження визначено залежності необхідної мінімальної

товщини вогнезахисного покриття для таких несучих сталевих конструкцій, як колони і балки, від теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі і дані щодо різниці у значеннях такої товщини, отриманих для різних номінальних температурних режимів.

Встановлено, що як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі необхідна мінімальна товщина вогнезахисного покриття збільшується із підвищенням коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу, коефіцієнта поперечного перерізу, проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції і зі зменшенням критичної температури сталі. Діапазон значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, отриманих для застосовних під час проведених розрахунків параметрів системи вогнезахисту, складає від 0,21 мм до 452 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.

Встановлено, що різниця між

значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття для сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, і значеннями такої товщини, визначеними за стандартного температурного режиму, має позитивні значення (від 5,74 % до 214 %), а для умов вогневого впливу за температурним режимом зовнішньої пожежі – від’ємні (від –7,52 % до –64,7 %). Ця різниця як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі з підвищенням коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу, коефіцієнта поперечного перерізу та зі зменшенням критичної температури сталі зменшується. Закономірним є те, що з підвищенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції для температурного режиму вуглеводневої пожежі різниця між товщинами зменшується, а для температурного режиму зовнішньої пожежі – збільшується (за модулем).

Визначено напрями подальших досліджень, які орієнтовані на виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на необхідну мінімальну товщину різних систем вогнезахисту для сталевих конструкцій, в яких застосовуються вогнезахисні матеріали зі змінним коефіцієнтом теплопровідності та різною густиною, а також вогнезахисні екрани.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1–2 : General rules. Structural fire design. European Committee For Standardization. Central Secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p.
2. 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.
3. 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.
4. Калафат К., Вахитова Л. Аналитический обзор средств огнезащиты стальных конструкций 2021–2022. Украинский центр стального производства, 2022. 200 с.
5. 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.
6. 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.

7. Круковский П. Г., Новак С. В., Поклонский В. Г., Еременко С. А., Фролов Г. А. Оценка огнестойкости металлических строительных конструкций и огнезащитной способности покрытий (расчетно-экспериментальный подход) : коллективная монография. Киев : Франко Пак, 2021. 148 с.
8. Новак С., Дридз В., Добростан О., Новак М. Вплив теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на тепловий стан сталевих колон за стандартного температурного режиму. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(13). С. 88–110.
9. Голованов В. И., Крючков Г. И. Оценка огнестойкости стальных конструкций при нормируемых температурных режимах пожара. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение и ликвидация*. 2021. № 3. С. 52–60.
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*. 2016. № 1(1). С. 59–65.
11. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ : Мінрегіон України, 2016. 111 с.
12. Круковский П. Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход) : монография. Київ : Інститут технічної теплофізики НАН України, 1996. 218 с.
13. ДСТУ Б В.1.1-4-98* Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Київ : Держбуд України, 2005. 19 с.
14. Chao Zhang, Adam Pintar, Jonathan M. Weigand, Joseph A. Main, Fahim Sadek. Impact of variability in thermal properties of SFRM on steel temperatures in fire. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 123. P. 103361. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103361>.

REFERENCES

1. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2 : General rules – Structural fire design. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p. [in English].
2. 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].
3. 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. [in English].
4. Kalafat, K., Vakhitova, L. (2022). Analitichnyi ohliad zasobiv vohnezakhystu stalevykh konstrukttsii 2021-2022. Ukrainskiyi tsentr stalevoho vyrobnytstva. Retrieved from https://rautagroup.com/wp-content/uploads/2018/02/fireproofing-materials_catalog_2021-22.pdf [in Ukrainian].
5. 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 ecretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 61 p. [in English].
6. 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].
7. Krukovskiy, P. H., Novak, S. V., Poklonskiy, V. H., Yeromenko, S. A., Frolov, H. A. (2021). Otsinka vohnestiikosti metalevykh budivelnnykh konstrukttsii ta vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttiv (rozrakhunkovo-eksperymentalnyi pidkhid) [Оцінка вогнестійкості металевих будівельних конструкцій та вогнезахисної здатності покриттів (розрахунково-експериментальний підхід)]. Kyiv: TOV «Franko Pak» [in Ukrainian].
8. Novak, S., Dridzh, V., Dobrostan, O., Novak, M. (2022). Vplyv teplofizychnykh vlastyvostei vohnezakhysnykh materialiv na teplovyi stan stalevykh kolon za standartnoho temperaturnoho rezhymu [The influence of thermophysical properties of flame retardant materials on the thermal state of steel columns under a standard temperature regime]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, № 1(13), 88–110. [in Ukrainian].
9. Holovanov, V. I., Kriuchkov, H. I. (2021). Otsinka vohnestiikosti stalevykh konstrukttsii za normovanykh temperaturnykh rezhymiv pozhezhi [Assessment of fire resistance of steel structures under standardized fire temperature regimes. Fires and emergencies: prevention and elimination]. *Pozhezhi ta nadzvychaini sytuatsii: zapobihannia ta likvidatsiia*, 3, 52–60. [in Ukrainian].
10. Kovalov, A. I., Zobenko, N. V. (2016). Metodyka poperednoi otsinky vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttiv dlia stalevykh konstrukttsii v umovakh temperaturnoho rezhymu vuhleводневої pozhezhi [The method of preliminary assessment of the fire protection ability of coatings for steel structures under the conditions of the temperature regime of a hydrocarbon fire]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(1), 59–65. [in Ukrainian].
11. DSTU-N B V.2.6-211:2016. Proektuvannya stalevykh konstrukttsii. Rozrakhunok konstrukttsii na vohnestiikist [Design of steel structures. Calculation of structures for fire resistance]. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2016. 111 s. [in Ukrainian].
12. Krukovskiy, P. G. (1996). Obratnyye zadachi teplomassopere nosa (obshchiy inzhenernyy podkhod) [Inverse problems of heat and mass transfer (general engineering approach)]. Kyiv: Instytut tekhnichnoi teplofizyky NAN Ukrainy. [in Russian].
13. DSTU B V.1.1-4-98*. Zakhyst vid pozhezhi. Budivelni konstrukttsii. Metody vyprobuvan na vohnestiikist. Zahalni vymohy (2005). [Fire protection. Building constructions. Test methods for firefighters. General requirement]. Kyiv: Derzhbud Ukrainy. 19 p. [In Ukrainian].
14. Chao Zhang, Adam Pintar, Jonathan M. Weigand, Joseph A. Main, Fahim Sadek (2021). Impact of variability in thermal properties of SFRM on steel temperatures in fire. *Fire Safety Journal*, 123, 103361. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103361> [in English].

INFLUENCE OF FIRE TEMPERATURE REGIME ON THE REQUIRED MINIMAL THICKNESSES OF FIRE-RETARDANT COATINGS FOR STEEL MEMBERS

S. Novak¹, O. Dobrostan¹, M. Pustovy²

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

²*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chornobyl of the National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine*

KEYWORDS

fire-retardant coating, thermal conductivity, critical temperature of steel, minimal required thickness, nominal temperature-time curve, steel member, thermophysical properties

ANNOTATION

The lack of data on the relationship between the values of the required minimal thickness of fire-retardant coatings for steel members, obtained for the conditions of fire exposure under the temperature regimes of hydrocarbon and external fire, and the values of this thickness for the nominal temperature-time curve of fire limits the scope of application of such fire-retardant materials. The objective of current study was to determine the influence of these nominal fire temperature regimes on the required minimal thickness of the fire-retardant coating for such load-bearing steel members as columns and beams, for wide ranges of changes in the thermophysical properties of the applicable fire-retardant material, the critical temperature of steel, the cross-sectional coefficient and the period of preservation fire resistance of steel member. The calculation method, which is based on the solution of the direct one-dimensional problem of thermal conductivity, determines the data on the required minimal thickness of fire-retardant coating for the temperature regimes of hydrocarbon and external fire and the data on the difference between these obtained values and the values of such thickness established for the temperature-time curve. It was established that the difference between the values of the required minimal thickness of fire-retardant coating for steel members, obtained for the conditions of fire exposure under the temperature regime of a hydrocarbon fire, and the values of this thickness determined under the temperature-time curve, has positive values (from 5.74% to 214%) , while for the conditions of fire exposure under the temperature regime of an external fire, they are negative (from -7.52% to -64.7%). This difference, both for the conditions of exposure to fire under the temperature regime of a hydrocarbon fire and for the conditions of exposure to fire under the temperature regime of an external fire, decreases with an increase in the coefficient of thermal conductivity of the applicable fire-retardant material, the coefficient of the cross-section and with a decrease in the critical temperature of steel. It is natural that with an increase in the time interval of preservation of the fire resistance of a steel member for the temperature regime of a hydrocarbon fire, the difference between the thicknesses decreases, and for the temperature regime of an external fire, it increases (by modulus).