

УДК 614.841.45

СПІВВІДНОШЕННЯ НЕОБХІДНОЇ МІНІМАЛЬНОЇ ТОВЩИНИ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА РІЗНИМИ НОМІНАЛЬНИМИ ТЕМПЕРАТУРНИМИ РЕЖИМАМИ ПОЖЕЖІ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2.63-74>

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

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:

28.09.2024

Пройшла рецензування:

10.10.2024

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогнестійкість, вогнезахисне покриття, критична температура, проміжок часу, температурний режим, товщина, співвідношення, сталева конструкція

АНОТАЦІЯ

Недостатня визначеність співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі зумовлює необхідність проведення досліджень, спрямованих на оцінювання цієї товщини для покриттів, створених із реактивних і пасивних вогнезахисних матеріалів, за умов вогневого впливу, які відмінні від стандартних і наведені в EN 1363-2. У дослідженні ставилось за мету визначення співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини реактивного вогнезахисного покриття певної торговельної марки за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 та стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 для сталевих конструкцій, які мають широкий діапазон змінювання їхніх параметрів. За методом, який ґрунтується на положеннях EN 13381-8 і ДСТУ Б В.1.1-17, визначено співвідношення (різницю) між значеннями необхідної мінімальної товщини реактивного вогнезахисного покриття торговельної марки «Ендотерм 400202» за різними номінальними температурними режимами пожежі для сталевих конструкцій, що мають такі параметри: коефіцієнт поперечного перерізу від 40 м^{-1} до 300 м^{-1} , критичну температуру від 350°C до 700°C і проміжок часу збереженості вогнестійкості від 30 хв до 60 хв. Встановлено, що величина цієї різниці, залежно від параметрів сталевих конструкцій, за температурного режиму вуглеводневої пожежі змінюється від 79% до 874%, а за температурного режиму зовнішньої пожежі – від 6% до 39%. Як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і зовнішньої пожежі величина різниці зменшується з підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу і зниженням критичної температури та значно залежить від проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій. Показано, що закономірним є зменшення величини різниці з підвищенням цього проміжку часу за температурного режиму вуглеводневої пожежі та її збільшення за температурного режиму зовнішньої пожежі.

Постановка проблеми. Для забезпечення вогнестійкості сталевих конструкцій використовують вогнезахисні покриття, які мають товщину, необхідну для збереженості несучої здатності цих конструкцій. Значення цієї товщини зазвичай визначають за сценарієм умовної пожежі із застосуванням стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1

[1]. Однак сталеві конструкції можуть піддаватися впливу інших номінальних температурних режимів пожежі – температурних режимів вуглеводневої та зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 [2]. У цьому разі проблемним питанням для користувачів вогнезахисних матеріалів є визначення необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів для зазначених температурних режимів, які

відмінні від стандартного. Для прогнозування цієї товщини можливе застосування розрахункових даних стосовно співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 [2] і її значеннями за стандартного температурного режиму, які наведені в [3]. Однак на підтвердження такого припущення не визначено цього співвідношення для реактивних і пасивних вогнезахисних покриттів конкретних торговельних марок і сталевих конструкцій (колон і балок), які мають широкий діапазон змінювання їхніх параметрів (коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості). Отже, є підстави вважати, що недостатня визначеність співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі зумовлює необхідність проведення досліджень в цьому напрямі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У будівельній практиці сталеві конструкції зазвичай стандартизовані на основі їхньої вогнестійкості щодо целюлозної пожежі, яка визначається згорянням деревини і характеризується стандартним температурним режимом згідно з EN 1363-1 [1]. Однак під час пожежі на об'єктах нафтохімічної та газової промисловості інтенсивність теплового впливу на конструкції більша, ніж для целюлозних пожежі. Через це вогнестійкість конструкцій під час вуглеводневих пожежі менша, ніж для целюлозних. Для незахищених сталевих конструкцій відношення їхньої вогнестійкості за целюлозної пожежі до вогнестійкості за вуглеводневої пожежі залежить від коефіцієнта поперечного перерізу конструкції і може досягати 3,9 [4]. Певні дані щодо цього відношення для

захищених сталевих конструкцій наведено в роботах [5–6]. У роботі [7] вказано залежність відношення вогнестійкості захищених сталевих конструкцій за стандартного та вуглеводневого температурних режимів пожежі від проміжку часу збереженості вогнестійкості за стандартного температурного режиму, отриману на основі експериментальних досліджень, розрахунків та моделювання. У роботі [8] наведено результати розрахункового дослідження відсоткової різниці між вогнестійкістю захищених сталевих конструкцій за вуглеводневого та стандартного температурних режимів пожежі. В ній зазначено закономірності щодо залежності цієї різниці від параметрів сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту (теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, критичної температури, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості). У цій роботі також наведено аналогічні розрахункові залежності відсоткової різниці між вогнестійкістю захищених сталевих конструкцій за температурного режиму зовнішньої пожежі, для якої інтенсивність теплового впливу на конструкції менша, ніж для целюлозної пожежі, й стандартного температурного режиму.

Потрібно зазначити, що дані стосовно співвідношення вогнестійкості сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі є важливими для практики, оскільки дають змогу прогнозувати проміжок часу збереженості вогнестійкості конструкцій за інших режимів, ніж стандартний. Однак більшу практичну значущість мають дані щодо співвідношення необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі. За такими даними можна визначати необхідну мінімальну товщину вогнезахисних покриттів за номінальними температурними режимами пожежі, які відмінні від стандартного, маючи

результати випробування, отримані за стандартних умов, наведених в EN 1363-1 [1]. У роботі [9] показано, що для сталевих конструкцій з реактивним вогнезахисним покриттям «Amotherm Steel Wb», для критичної температури 500 °C і проміжку часу збереженості вогнестійкості 30 хв, значення необхідної мінімальної товщини покриття за температурного режиму вуглеводневої пожежі приблизно удвічі більші, ніж за стандартного температурного режиму. Розрахункові дані стосовно відсоткової різниці між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття сталевих конструкцій за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі і її значеннями за стандартного температурного режиму наведено в [3]. У зазначеній роботі надано залежності цієї різниці від теплофізичних властивостей вогнезахисного покриття, критичної температури, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості, а розрахунки виконано для гіпотетичного вогнезахисного покриття, що має сталі значення коефіцієнта теплопровідності. Проте для реальних вогнезахисних покриттів значення цього коефіцієнта не є сталим і залежить від низки параметрів, зокрема від температури [10]. Водночас найбільшу залежність від температури коефіцієнт теплопровідності має для реактивних вогнезахисних покриттів [11–12].

Підсумовуючи, варто зазначити, що наведені вище результати досліджень дадуть змогу обґрунтовано підходити до визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості й необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій для сценаріїв умовної пожежі, які відрізняються від стандартного, наведеного в EN 1363-1 [1]. У цих дослідженнях надано експериментальні й розрахункові дані щодо співвідношення вогнестійкості й необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття сталевих конструкцій за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі згідно з

EN 1363-2 [2] та стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 [1]. Для обґрунтування практичної застосовності цих розрахункових даних є потреба у визначенні такого співвідношення для реактивних і пасивних вогнезахисних покриттів конкретних торговельних марок та сталевих конструкцій, які мають широкий діапазон змінювання їхніх параметрів.

Формулювання цілей дослідження. За мету дослідження ставилося визначення співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини реактивного вогнезахисного покриття певної торговельної марки за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 [2] та стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 [1] для сталевих конструкцій, які мають широкий діапазон змінювання їхніх параметрів (коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури та проміжку часу збереженості вогнестійкості).

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

- обґрунтувати метод визначення співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини реактивного вогнезахисного покриття за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі і стандартного температурного режиму;

- визначити експериментальні дані щодо теплового стану зразків захищених сталевих конструкцій, оснащених реактивним вогнезахисним покриттям, за умов впливу стандартного температурного режиму;

- визначити значення необхідної мінімальної товщини реактивного вогнезахисного покриття за стандартним температурним режимом і температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі;

- визначити співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини реактивного вогнезахисного покриття за температурними режимами

вуглеводневої та зовнішньої пожежі і стандартного температурного режиму;

– виявити закономірності щодо залежностей зазначеного співвідношення від коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій.

Методи дослідження. Застосовано метод дослідження, складовими якого є експериментальне визначення теплового стану зразків захищених сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму, ідентифікація теплофізичних властивостей вогнезахисного покриття через розв’язання оберненої задачі теплопровідності, розв’язання прямої задачі теплопровідності для визначення температури захищених сталевих конструкцій у різні проміжки часу вогневого впливу, розв’язання задачі оптимізації для визначення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття, аналіз, порівняння, узагальнення, апроксимація і систематизація отриманих розрахункових даних.

Виклад основного матеріалу. Для визначення співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини реактивного вогнезахисного покриття за температурними режимами

вуглеводневої та зовнішньої пожежі і за стандартного температурного режиму застосовано метод, який ґрунтується на положеннях EN 13381-8 [13] і ДСТУ Б В.1.1-17 [14]. Сутність цього метода полягає у проведенні вогневого випробування за стандартного температурного режиму набору навантажених і ненавантажених зразків захищених сталевих конструкцій, визначенні за отриманими експериментальними даними щодо температури зразків теплофізичних властивостей вогнезахисного покриття, розрахунку значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за різними номінальними температурними режимами пожежі й співвідношення між ними для широкого діапазону параметрів сталевих конструкцій.

У таблиці 1 наведено параметри зразків захищених сталевих конструкцій – ненавантажених коротких колон заввишки 1000 мм, ненавантаженої високої колони заввишки 2000 мм, навантажених балок завдовжки 4700 мм і ненавантажених балок для порівняння завдовжки 1000 мм, для яких в експерименті визначали температуру $\theta_{a,exp}$ їхньої металеві поверхні (під шаром вогнезахисного покриття) у різні проміжки часу вогневого впливу за стандартного температурного режиму.

Таблиця 1 – Параметри експериментальних зразків сталевих конструкцій

№ зразка	Вид конструкції	Типорозмір профілю	Коефіцієнт поперечного перерізу A_p/V , м ⁻¹	Товщина покриття d_p , мм
1	Коротка колона	IPE 200	306,2	1,193
2	Коротка колона	IPE 200	306,2	1,854
3	Коротка колона	HEA 200	234,3	0,429
4	Коротка колона	HEA 200	234,3	1,919
5	Коротка колона	HEA 300	169,9	0,385
6	Коротка колона	HEA 300	169,9	1,886
7	Коротка колона	HEB 300	129,7	0,413
8	Коротка колона	HEB 450	102,1	1,992
9	Коротка колона	IPE 200	76,6	1,155
10	Коротка колона	HEM 280	76,6	0,373
11	Висока колона	HEA 300	169,9	1,785
12	Навантажена балка	Двотавр №45	165,9	0,445
13	Навантажена балка	Двотавр №45	165,9	1,987
14	Балка для порівняння	Двотавр №45	165,9	0,455
15	Балка для порівняння	Двотавр №45	165,9	1,819

Для навантажених балок в експерименті також визначали їхні прогини і проміжки часу до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності. Для створення вогнезахисного покриття на зразках використовували реактивний вогнезахисний матеріал «Ендотерм 400202» [15].

За отриманими експериментальними даними щодо температури зразків $\theta_{a,exp}$ визначено їхні значення проміжку часу t_{exp} до досягнення критичної температури, які наведено в табл. 2. Враховуючи те, що значення товщини вогнезахисного покриття різні для навантаженої балки (зразок № 12) порівняно з ненавантаженою (зразок № 14), навантаженої балки (зразок № 13) порівняно з ненавантаженою (зразок

№ 15) та високої колони (зразок № 11) порівняно з короткою (зразок № 6), за додатком D EN 13381-8 [13] здійснено коригування проміжків часу t_{exp} для зразків № 6, № 14, № 15. Порівнюючи показники щодо проміжків часу t_{exp} на навантажених балках (зразки № 12, № 13) та високій колоні (зразок № 11) з показниками, отриманими з використанням ненавантажених балок (зразки № 14, № 15) і короткої колони (зразок № 6), за цим же додатком D EN 13381-8 [13] визначено кориговані значення проміжку часу t_c до досягнення критичної температури коротких колон (зразки № 1–10), з урахуванням показників вогнезахисного покриття щодо його «здатності до зчеплення», які наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Значення проміжків часу t_{exp} і t_c

Критична температура $\theta_{cr}, ^\circ C$	350	400	450	500	550	600	650	700
№ зразка	Проміжки часу t_{exp}/t_c , хв							
1	23/23	31/30	37/36	43/41	48/46	53/51	58/57	63/63
2	32/32	42/41	49/48	54/54	60/60	65/65	72/71	79/79
3	16/16	21/20	25/24	29/27	33/30	36/34	40/38	44/44
4	36/36	47/47	55/55	62/62	68/68	74/74	81/81	89/89
5	19/19	24/23	28/27	32/30	36/33	40/37	44/42	49/49
6	40/40	54/53	64/64	73/73	80/80	88/88	96/96	104/104
7	20/20	26/25	31/29	35/33	39/36	43/40	47/45	52/52
8	49/49	62/61	74/74	84/84	94/94	104/104	115/115	–
9	42/42	54/53	64/62	73/70	81/78	90/87	100/97	112/112
10	26/26	33/32	39/37	44/41	49/46	54/51	59/57	64/64
11	42	57	67	76	84	92	101	109
12	22	27	32	36	41	45	50	56
13	49	63	73	83	93	100	106	111
14	22	28	33	38	43	48	54	60
15	46	59	68	77	86	95	105	115

За даними щодо температури $\theta_{a,exp}$, отриманими для коротких колон, і їхніх коригованих проміжків часу t_c , за процедурою, заснованою на розв'язанні оберненої задачі теплопровідності й положеннях, наведених в додатку Л ДСТУ Б В.1.1-17 [14], додатку П.2 ДСТУ-Н Б В.2.6-211 [16], додатку Е EN 13381-8 [13] і роботах [17–19], визначено теплофізичні властивості застосовного в

експериментальних зразках вогнезахисного покриття – його коефіцієнт теплопровідності λ_p , залежний від температури, і питому об'ємну теплоємність $c_p \rho_p$, як константу.

На першому етапі шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності із застосуванням комп'ютерної програми FRIEND [17] визначали такі значення λ_p у вузлових

точках кусково-лінійної залежності від температури і сталі значення $c_p \rho_p$, за яких середньоквадратичний відхил F розрахункових $\theta_{a,calc}$ від експериментальних $\theta_{a,exp}$ значень температури коротких колон є

мінімальним. Отримані результати щодо коефіцієнта теплопровідності λ_p наведено в табл. 3. Для цього розв'язку $c_p \rho_p = 100$ кДж/(м³·°C) і $F = 10,4$ °C. Вт/(м·°C).

Таблиця 3 – Значення λ_p і $\lambda_{p,c}$ у вузлових точках

Номер вузлової точки i	1	2	3	4
Температура вузлової точки $\theta_{p,i}$, °C	0	400	800	1200
Коефіцієнт теплопровідності λ_p , Вт/(м·°C)	0,0746	0,0156	0,00281	0,185
Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{p,c}$, Вт/(м·°C)	0,0753	0,0163	0,00351	0,186

На другому етапі визначали прийнятність отриманого розв'язку з огляду на такі вимоги (критерії прийнятності) [13]:

а) для кожної короткої колони жоден розрахунковий (прогнозований) проміжок часу t_{calc} до досягнення критичної температури, визначений для отриманого розв'язку оберненої задачі теплопровідності, не повинен перевищувати коригованого проміжку часу t_c більше ніж на 15%;

б) середнє значення всіх відсоткових відмінностей розрахункових від коригованих проміжків часу, визначених згідно з а), має бути меншим за нуль;

с) більшим за нуль мають бути не більше ніж 30% окремих значень усіх відсоткових відмінностей розрахункових від коригованих проміжків часу, визначених згідно з а).

Ураховуючи те, що вимога с) для отриманого розв'язку оберненої задачі теплопровідності не виконувалася, здійснено коригування значень коефіцієнта теплопровідності λ_p у вузлових точках, наведених в табл. 3, користуючись такою формулою:

$$\lambda_{p,c}(\theta_{p,i}) = \lambda_p(\theta_{p,i}) + K\lambda_{sp}, \quad (1)$$

де $\lambda_{p,c}(\theta_{p,i})$ – кориговане значення коефіцієнта теплопровідності в i -тій вузловій точці за температури $\theta_{p,i}$;

$\lambda_p(\theta_{p,i})$ – значення коефіцієнта теплопровідності в i -тій вузловій точці за температури $\theta_{p,i}$, визначене шляхом

розв'язання оберненої задачі теплопровідності;

$\theta_{p,i}$ – температура i -тої вузлової точки;

i – номер вузлової точки, $i = 1, 2, \dots, n$, де n – кількість вузлових точок;

K – коефіцієнт;

λ_{sp} – відхил, значення якого обчислювали за такою формулою:

$$\lambda_{sp} = \sum_{i=1}^n \lambda_p(\theta_{p,i}) / 10n. \quad (2)$$

Для цього коригування застосовано таку ітераційну процедуру. За формулами (1)–(2) і величиною коефіцієнта $K = 0,1$ визначали кориговані значення коефіцієнта теплопровідності в усіх вузлових точках. За отриманими таким чином даними щодо $\lambda_{p,c}(\theta_{p,1})$, $\lambda_{p,c}(\theta_{p,2})$, $\lambda_{p,c}(\theta_{p,3})$, $\lambda_{p,c}(\theta_{p,4})$, для кожної короткої колони розв'язанням прямої задачі теплопровідності, яке виконували із застосуванням комп'ютерної програми FRIEND [17], розраховували температуру зразків і визначали їхні розрахункові проміжки часу t_{recalc} до досягнення критичних температур. Усі отримані значення t_{recalc} порівнювали з коригованими проміжками часу t_c за введеними вище критеріями прийнятності а), б), с). Ураховуючи те, що всі зазначені вище критерії прийнятності для першої ітерації виконувалися, величину коефіцієнта K зменшено удвічі та здійснено аналогічні розрахунки проміжків часу t_{recalc} і їхнє порівняння з коригованими проміжками часу t_c .

Ураховуючи те, що для цієї другої ітерації вимога с) не виконувалася, значення $\lambda_{p,c}(\theta_{p,1})$, $\lambda_{p,c}(\theta_{p,2})$, $\lambda_{p,c}(\theta_{p,3})$, $\lambda_{p,c}(\theta_{p,4})$, які використовували на першій ітерації, прийнято за такі, що відображають властивості вогнезахисного покриття. Ці кориговані значення коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,c}$ у вузлових точках наведено в табл. 3.

Користуючись отриманими коригованими величинами коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,c}(\theta_{p,1})$, $\lambda_{p,c}(\theta_{p,2})$, $\lambda_{p,c}(\theta_{p,3})$, $\lambda_{p,c}(\theta_{p,4})$ і сталим значенням питомої об'ємної теплоємності $c_p \rho_p = 100$ кДж/(м³·°C), за процедурою, наведеною в роботі [3], визначено значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за стандартного температурного режиму і температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожеж для сталевих конструкцій, які мають широкий діапазон їхніх параметрів – критичної температури ($\theta_{cr,min} = 350$ °C; $\theta_{cr,med} = 500$ °C; $\theta_{cr,max} = 700$ °C), коефіцієнта поперечного перерізу ($(A_p/V)_{min} = 40$ м⁻¹; $(A_p/V)_{med} = 150$ м⁻¹; $(A_p/V)_{max} = 300$ м⁻¹) і проміжку часу збереженості вогнестійкості ($t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 45$ хв; $t_{fr,max} = 60$ хв). За формулами (3), (4) розраховано різницю між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожеж і значеннями цієї товщини за стандартного температурного режиму. Отримані розрахункові дані

надано в табл. 4 та 5. Прочерки в табл. 5 пов'язані з тим, що для температурного режиму зовнішньої пожежі сталева конструкція не може досягнути температури 700 °C через те, що максимальне значення температури газового середовища для цього режиму згідно з EN 1363-2 [2] становить 680 °C.

$$\delta_{d,HC} = 100(d_{p,min,HC} - d_{p,min})/d_{p,min} ; \quad (3)$$

$$\delta_{d,ef} = 100(d_{p,min,ef} - d_{p,min})/d_{p,min} , \quad (4)$$

де $\delta_{d,HC}$ – різниця між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за температурного режиму вуглеводневої пожежі та стандартного температурного режиму, %;

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

$d_{p,min,HC}$ і $d_{p,min,ef}$ – значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожеж, мм;

$d_{p,min}$ – значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за стандартного температурного режиму, мм.

Таблиця 4 – Дані щодо різниці $\delta_{d,HC}$

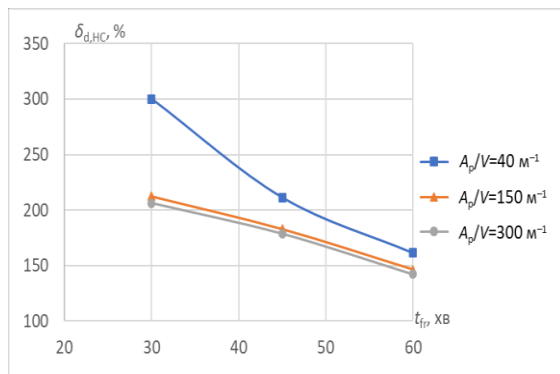
A_p/V , м ⁻¹	Значення $\delta_{d,HC}$ (%) для:								
	$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,max}$
40	106,9	300,0	—	97,4	211,3	855,6	86,1	161,3	422,9
150	94,6	212,7	874,1	93,9	183,0	451,2	83,3	146,3	270,0
300	91,8	206,2	761,0	90,1	178,7	428,1	79,0	142,2	244,6

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

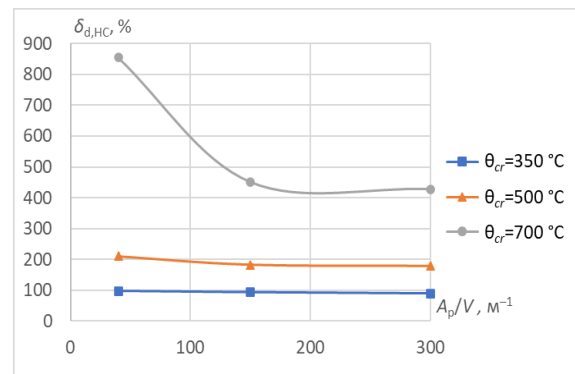
A_p/V , м ⁻¹	Значення $\delta_{d,ef}$ (%) для:								
	$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,max}$
40	-11,9	-30,9	—	-13,3	-35,4	—	-16,9	-39,4	—
150	-7,2	-16,6	—	-9,8	-24,6	—	-15,3	-34,6	—
300	-6,3	-14,0	—	-9,2	-23,7	—	-14,4	-34,2	—

Із аналізу даних, наведених у табл. 4, випливає, що різниця $\delta_{d,HC}$ між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за температурного режиму вуглеводневої пожежі й стандартного температурного режиму залежить від коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V , критичної температури сталі θ_{cr} та проміжку часу збереженості вогнестійкості t_{fr} і змінюється в діапазоні від 79% до 874%. Із підвищенням t_{fr} та A_p/V і зниженням θ_{cr} різниця зменшується. Найбільший вплив на її величину мають проміжок часу t_{fr} та критична температура θ_{cr} . Зокрема, за $\theta_{cr,med} = 500^\circ\text{C}$ із підвищенням проміжку

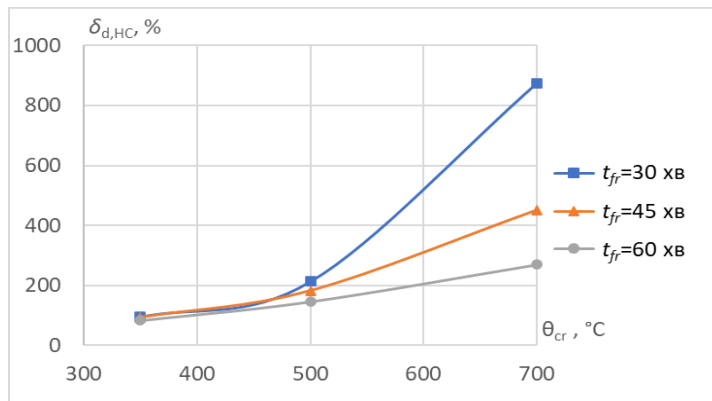
часу від 30 хв до 60 хв різниця зменшується: від 300% до 161% – за $(A_p/V)_{min} = 40\text{ м}^{-1}$; від 213% до 146% – за $(A_p/V)_{med} = 150\text{ м}^{-1}$; від 206% до 142% – за $(A_p/V)_{max} = 300\text{ м}^{-1}$ (рис. 1а). За $t_{fr,med} = 45$ хв із підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу від 40 м^{-1} до 300 м^{-1} різниця зменшується: від 97% до 90% – за $\theta_{cr,min} = 350^\circ\text{C}$; від 211% до 179% – за $\theta_{cr,med} = 500^\circ\text{C}$; від 856% до 428% – за $\theta_{cr,max} = 700^\circ\text{C}$ (рис. 1б). За $(A_p/V)_{med} = 150\text{ м}^{-1}$ із підвищенням критичної температури від 350°C до 700°C різниця збільшується: від 95% до 874% – за $t_{fr,min} = 30$ хв; від 94% до 451% – за $t_{fr,med} = 45$ хв; від 83% до 270% – за $t_{fr,max} = 60$ хв (рис. 1в).



а



б



в

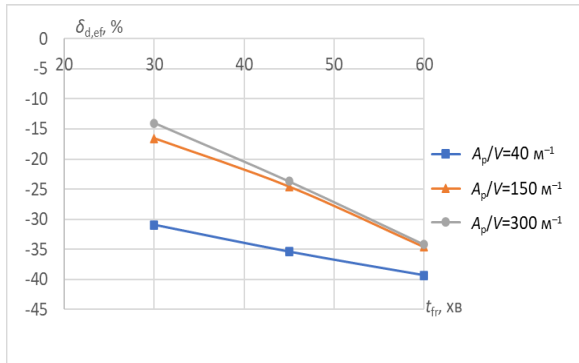
Рисунок 1 – Залежності різниці $\delta_{d,HC}$ від проміжку часу t_{fr} (а), коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V (б) і критичної температури θ_{cr} (в)

Із аналізу даних, наведених у табл. 5, випливає, що різниця $\delta_{d,ef}$ між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за температурного режиму зовнішньої пожежі й стандартного температурного

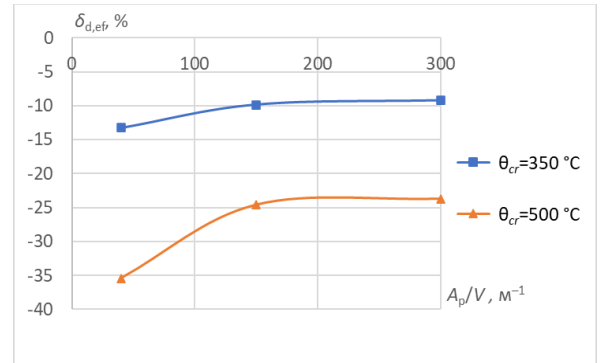
режиму, як і різниця $\delta_{d,HC}$, залежить від коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V , критичної температури θ_{cr} та проміжку часу збереженості вогнестійкості t_{fr} і змінюється в діапазоні від $-6,3\%$ до $-39,4\%$. Із підвищенням t_{fr} та θ_{cr} і

зменшенням A_p/V різниця $\delta_{d,ef}$ (за модулем) збільшується. Зокрема, за $\theta_{cr,med} = 500^\circ\text{C}$ із підвищенням проміжку часу від 30 хв до 60 хв величина різниці збільшується: від 30,9% до 39,4% – за $(A_p/V)_{min} = 40\text{ м}^{-1}$; від 16,6% до 34,6% – за $(A_p/V)_{med} = 150\text{ м}^{-1}$; від 14,0% до 34,2% – за $(A_p/V)_{max} = 300\text{ м}^{-1}$ (рис. 2а). За $t_{fr,med} = 45$ хв із підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу від 40 м^{-1} до 300 м^{-1} величина різниці

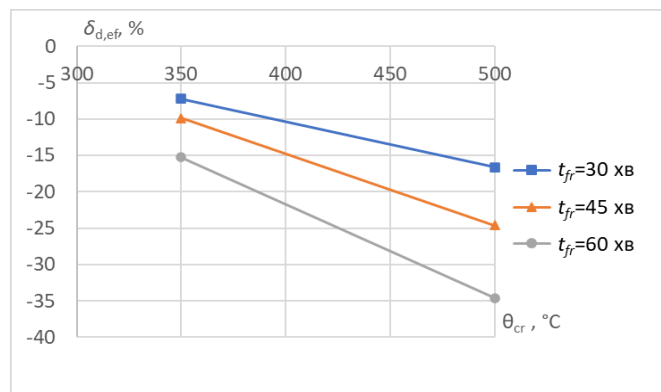
зменшується: від 13,3% до 9,2% – за $\theta_{cr,min} = 350^\circ\text{C}$; від 35,4% до 23,7% – за $\theta_{cr,med} = 500^\circ\text{C}$ (рис. 2б). За $(A_p/V)_{med} = 150\text{ м}^{-1}$ із підвищенням критичної температури сталі від 350°C до 500°C величина різниці збільшується: від 7,2% до 16,6% – за $t_{fr,min} = 30$ хв; від 9,8% до 24,6% – за $t_{fr,med} = 45$ хв; від 15,3% до 34,6% – за $t_{fr,max} = 60$ хв (рис. 2в).



а



б



в

Рисунок 2 – Залежності різниці $\delta_{d,ef}$ від проміжку часу t_{fr} (а), коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V (б) і критичної температури θ_{cr} (в)

Із аналізу отриманих результатів випливає, що величина різниці між значеннями необхідної мінімальної товщини реактивного вогнезахисного покриття «Ендотерм 400202» за різними номінальними температурними режимами пожежі як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і зовнішньої пожежі із підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу і зниженням критичної температури зменшується. Ця різниця значно залежить від проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій

конструкції. Закономірним є зменшення її величини з підвищенням цього проміжку часу за температурного режиму вуглеводневої пожежі та її збільшення за температурного режиму зовнішньої пожежі. Це зумовлено відмінністю у рівнях теплового впливу на захищену сталеву конструкцію, що відбувається в умовах різних номінальних температурних режимів пожежі [3].

Отримані результати проведеного дослідження можуть вважатися за доцільні з практичного погляду, тому що дають змогу обґрунтовано підходити до

оцінювання необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття сталевих конструкцій для умов вогневого впливу за іншими номінальними температурними режимами пожежі, ніж стандартний. З теоретичного погляду вони дають можливість стверджувати про визначеність впливу номінальних температурних режимів пожежі на необхідну мінімальну товщину реактивного вогнезахисного покриття для таких несучих сталевих конструкцій, як колони і балки, що є певними перевагами проведеного дослідження. Однак неможливо не зауважити, що результати цього дослідження отримано тільки для одного реактивного вогнезахисного покриття певної торговельної марки. Зазначене може призвести до наявності відмінностей в отриманих результатах стосовно співвідношення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за різними номінальними температурними режимами пожежі.

Така невизначеність накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися, як недоліки цього дослідження. Неможливість зняти вказані обмеження в рамках цього дослідження породжує потенційно цікавий напрям подальших досліджень. Вони, зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення впливу параметрів сталевих конструкцій на зазначене співвідношення для покриттів, створених із пасивних вогнезахисних матеріалів – штукатурок, плит, матів, а також на визначення спрощених залежностей для цього співвідношення, що прийнятні для інженерних розрахунків.

Висновки та напрями подальших досліджень. У проведеному дослідженні визначено співвідношення (різницю) між значеннями необхідної мінімальної товщини реактивного вогнезахисного покриття торговельної марки «Ендотерм 400202» за температурними режимами вуглеводневої

та зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 [2] і стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 [1] для сталевих конструкцій, які мають широкий діапазон змінювання їхніх параметрів – коефіцієнта поперечного перерізу від 40 м^{-1} до 300 м^{-1} , критичної температури від $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і проміжку часу збереженості вогнестійкості від 30 хв до 60 хв.

Встановлено, що величина цієї різниці, залежно від параметрів сталевих конструкцій, за температурного режиму вуглеводневої пожежі змінюється від 79% до 874%, а за температурного режиму зовнішньої пожежі – від 6% до 39%. Як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і зовнішньої пожежі величина різниці зменшується з підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу і зниженням критичної температури і значно залежить від проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій. Закономірним є зменшення величини різниці з підвищенням цього проміжку часу за температурного режиму вуглеводневої пожежі та її збільшення за температурного режиму зовнішньої пожежі. Зокрема, за критичної температури $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і коефіцієнта поперечного перерізу 150 м^{-1} із підвищенням проміжку часу від 30 хв до 60 хв величина різниці зменшується від 213% до 146% за температурного режиму вуглеводневої пожежі та збільшується від 16,6% до 34,6% за температурного режиму зовнішньої пожежі.

Визначено напрями подальших досліджень, які орієнтовані на виявлення впливу параметрів сталевих конструкцій на співвідношення необхідної мінімальної товщини за різними номінальними температурними режимами пожежі для покриттів, створених із пасивних вогнезахисних матеріалів – штукатурок, плит, матів, а також на визначення спрощених залежностей для цього співвідношення, прийнятних для інженерних розрахунків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Shebeko Y., Zuban A., Shebeko A. An evaluation of an actual fire resistance limit of non-protected steel structures for different temperature regimes of fires. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire Explos. Saf.* 2019. Vol. 28. P. 29–34.
5. 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>.
6. AXA XL Risk Consulting. GAPS© 2020. Available online: <https://axaxl.com/-/media/axaxl/files/pdfs/prc-guidelines/prc-2/prc251fireproofingforhydrocarbonfireexposuresv1.pdf>.
7. 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>.
8. 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.
9. Ковальов А., Зобенко Н. Методика попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій в умовах температурного режиму вуглеводнової пожежі. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2016. № 1 (1). С. 59–65.
10. 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: Франко Пак. 2021. 148 с.
11. Silva D., A. Bilotta A., Nigro E. Effect of the thermal input on the behavior of intumescent coatings. *ASFE 2017 – Applications of Structural Fire Engineering*, 7–8 September 2017, Manchester, UK. P. 351–360.
12. Bilotta A., Silva D., Nigro E. Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 121. P. 410–422.
13. 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.
14. 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.
15. Калафат К., Вахитова Л. *Аналитический обзор средств огнезащиты стальных конструкций 2021–2022*. Украинский центр стального производства, 2022. 230 с.
16. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ: *Мінрегіон України*. 2016. 111 с.
17. 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. V. 9. № 4. P. 516–532.
18. Григорян Н., Круковский П., Новак С. *Области применения стандартизированных методов определения огнезащитной способности огнезащитных покрытий металлических конструкций* : коллективная монография. Черкассы : ЧИПБ им. Героев Чорнобыля НУТЗ Украины. 2016. 137 с.
19. Новак С., Дріждь 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.

REFERENCES

1. 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].
2. 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].
3. Novak S., Dobrostan O., Pustovyi M. Vplyv temperaturnoho rezhymu pozhazhi na neobkhidnu minimalnu tovshchynu vohnezakhysnykh pokryttiv dlia stalevykh konstrukttsii. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhazhna bezpeka*. 2022. № 2 (14). S. 5–20 [in Ukrainian].
4. Shebeko Y., Zuban A., Shebeko A. An evaluation of an actual fire resistance limit of non-protected steel structures for different temperature regimes of fires. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire Explos. Saf.* 2019. Vol. 28. P. 29–34 [in English].
5. 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].
6. AXA XL Risk Consulting. GAPS© 2020. Available online: <https://axaxl.com/-/media/axaxl/files/pdfs/prc-guidelines/prc-2/prc251fireproofingforhydrocarbonfireexposuresv1.pdf> [in English].
7. 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].
8. Novak S., Dobrostan O., Pustovyi M. Vplyv temperaturnoho rezhymu pozhazhi na promizhok chasu zberezhenosti vohnestiikosti stalevykh konstrukttsii. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhazhna bezpeka*. 2023. № 1 (15). S. 18–31 [in Ukrainian].
9. Kovalov A., Zobenko N. Metodyka poperednoi otsinky vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttiv dlia stalevykh konstrukttsii v umovakh temperaturnoho rezhymu vuhlevodnovoi pozhazhi. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhazhna bezpeka*. 2016. № 1 (1). S. 59–65 [in Ukrainian].

10. Krukovskij P., Novak S., Poklonskij V., Eremenko S., Frolov G. Ocenka ognestojkosti metallicheskich stroitel'ny'kh konstrukcij i ognезashitnoj sposobnosti pokry'tij (raschetno-e'ksperimental'ny'j podkhod): kollektivnaya monografiya. Kiev: Izdatel'stvo TOV "Franko Pak". 2021. 148 s. [in Russian].
11. Silva D., A. Bilotta A., Nigro E. Effect of the thermal input on the behavior of intumescent coatings. ASFE 2017 – Applications of Structural Fire Engineering, 7–8 September 2017, Manchester, UK. P. 351–360 [in English].
12. Bilotta A., Silva D., Nigro E. Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures. Construction and Building Materials. 2016. Vol. 121. P. 410–422 [in English].
13. 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].
14. DSTU B V.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ) Zakhyst vid pozhezhi. Vohnezhakhysni pokryttia dlia budivelnnykh nesuchykh metalnykh konstruktсий. Metod vyznachennia vohnezhakhysnoi zdatsnosti. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. 2008. 65 s. [in Ukrainian].
15. Kalafat K., Vakhitova L. Analiticheskii obzor sredstv ognезashchiti stalnykh konstruktсий 2021–2022 [Analytical review of fire protection means for steel structures 2021–2022]. Ukrainskii tsentr stalnogo proizvodstva. 2022. 200 s. [in Russian].
16. DSTU-N B V.2.6-211:2016 Proektuvannia stalevykh konstruktсий. Rozrakhunok konstruktсий na vohnestiikist. Kyiv: Minrehion Ukrainy. 2016. 111 s. [in Ukrainian].
17. 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. V.9. № 4. P. 516–532 [in English].
18. Grigoryan N., Krukovskiy P., Novak S. Oblasti primeneniya standartizirovannykh metodov opredeleniya ognезaschitnoy sposobnosti ognезaschitnykh pokrytiy metallicheskich konstruktсий: kollektivnaya monografiya. Cherkassy: ChIPB im. Geroev Chornobyliya NUGZ Ukrainy. 2016. 137 s. [in Russian].
19. Novak S., Dridzh V., Dobrostan O., Novak M. Vplyv teplofizychnykh vlastyivostei vohnezhakhysnykh materialiv na teplovyi stan stalevykh kolon za standartnoho temperaturnoho rezhymu. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2022. № 1 (13). S. 88–110 [in Ukrainian].

THE RATIO BETWEEN THE VALUES OF THE REQUIRED MINIMUM THICKNESS OF FIRE PROTECTION COATINGS FOR STEEL STRUCTURES FOR DIFFERENT NOMINAL FIRE TEMPERATURE-TIME CURVES

S. Novak¹, M. Pustovyi²

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 Protection of Ukraine, Ukraine*

KEYWORDS: ANNOTATION

fire resistance,
fire protection
coating, critical
temperature,
retention time,
temperature-
time curve,
thickness, ratio,
steel structure

Insufficient certainty of the relationship between the values of the required minimum thickness of fire protection coatings for steel structures at different nominal fire temperature-time curves necessitates research aimed at assessing this thickness for coatings made of reactive and passive fire protection materials under fire exposure conditions specified in EN 1363-2 and differing from the standard ones. The study aimed to determine the ratio between the values of the required minimum thickness of a reactive fire protection coating of a certain brand for the temperature-time curves of hydrocarbon and external fires in accordance with EN 1363-2 and the standard temperature-time curve in accordance with EN 1363-1 for steel structures with a wide range of changes in their parameters. According to the method, which is based on the provisions of EN 13381-8 and DSTU B V.1.1-17, the ratio (difference) between the values of the required minimum thickness of the reactive fire protection coating of the Endotherm 400202 trademark at different nominal fire temperature-time curves for steel structures with the following parameters was determined: cross-sectional area ratio from 40 m⁻¹ to 300 m⁻¹, critical temperature from 350 °C to 700 °C and fire resistance retention time from 30 min to 60 min. It is determined that the value of this difference, depending on the parameters of the steel structure, varies from 79 % to 874 % under the temperature regime of a hydrocarbon temperature-time curve, and from 6 % to 39 % under the temperature-time curve of an external fire. For both the conditions of fire exposure under the temperature-time curves of a hydrocarbon fire and an external fire, the difference decreases with an increase in the cross-sectional coefficient and a decrease in the critical temperature and significantly depends on the fire resistance retention time of the steel structure. It is shown that it is natural to decrease the value of the difference with an increase in the fire resistance retention time at the temperature-time curve of a hydrocarbon fire and its increase at the temperature-time curve of an external fire.