

УДК 614.841.45

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА СПІВВІДНОШЕННЯ НЕОБХІДНОЇ МІНІМАЛЬНОЇ ТОВЩИНИ ПАСИВНИХ СИСТЕМ ВОГНЕЗАХИСТУ ЗА РІЗНИМИ НОМІНАЛЬНИМИ ТЕМПЕРАТУРНИМИ РЕЖИМАМИ ПОЖЕЖІ

[https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.\(19\).53-64](https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).53-64)

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 технічної теплофізики Національної академії наук України, Україна

²Національний університет цивільного захисту України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

28.04.2025

Пройшла рецензування:

10.05.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогнестійкість, вогнезахисне покриття, коефіцієнт перерізу, критична температура, проміжок часу, система вогнезахисту, температурний режим, товщина, співвідношення, сталева конструкція

АНОТАЦІЯ

Недостатня визначеність даних щодо співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини систем вогнезахисту сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі стримує застосування цих систем для сценаріїв умовної пожежі, які передбачають вогневий вплив, який відрізняється від стандартного температурного режиму, зазначеного в EN 1363-1.

Проведене дослідження ставило за мету виявлення залежностей співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини пасивної системи вогнезахисту певної торгової марки за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 і стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 від параметрів сталевих конструкцій – їхнього коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості.

За методом, який ґрунтується на положеннях EN 13381-4 і ДСТУ Б В.1.1-17, визначено таке співвідношення (відсоткову різницю) для пасивного вогнезахисного покриття, створеного з вермикуліто-цементних плит торгової марки «Ендотерм 210104», для сталевих конструкцій, які мають такі параметри: коефіцієнт поперечного перерізу від 40 м^{-1} до 300 м^{-1} , критичну температуру від $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і проміжок часу збереженості вогнестійкості від 30 хв до 240 хв. Встановлено, що величина цієї різниці, залежно від параметрів сталевих конструкцій, за температурного режиму вуглеводневої пожежі змінюється від 7 % до 239 %, а за температурного режиму зовнішньої пожежі – від 6 % до 54 %. Як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі так і зовнішньої пожежі із підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу величина різниці зменшується, а із підвищенням критичної температури збільшується. За температурного режиму вуглеводневої пожежі підвищення проміжку часу збереженості вогнестійкості призводить до суттєвого зменшення величини різниці. За температурного режиму зовнішньої пожежі з підвищенням цього проміжку часу величина різниці збільшується, проте вплив проміжку часу на різницю не такий значний, як за температурного режиму вуглеводневої пожежі.

Постановка проблеми.

Застосування профільованих і коробчастих систем вогнезахисту, створених з пасивних вогнезахисних матеріалів, забезпечує вогнестійкість сталевих конструкцій у всьому діапазоні нормованого проміжку часу збереженості їхньої несучої здатності, регламентованому в EN 13501-2 [1]. У

джерелах інформації, зокрема в [2; 3], подано дані щодо мінімальної товщини систем [4; 5] з використанням штукатурних вогнезахисних покриттів, плит, панелей та матів, необхідної для забезпечення нормованої вогнестійкості сталевих конструкцій. Переважну кількість цих даних отримано шляхом випробувань,

виконаних за методом, який наведено в EN 13381-4 [6] і передбачає вогневий вплив на конструкції за стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 [7]. Проте EN 1991-1-2 [8] визначає інші номінальні температурні режими пожежі, застосовні для оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій, – температурні режими вуглеводневої і зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 [9]. За цими температурними режимами значення необхідної мінімальної товщини систем вогнезахисту сталевих конструкцій будуть іншими ніж за стандартного температурного режиму [10], і користувачам вогнезахисних матеріалів для визначення параметрів систем вогнезахисту доцільно мати дані щодо співвідношення цієї товщини за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі із товщиною за стандартного температурного режиму.

Для встановлення залежностей щодо цього співвідношення, прийнятних для інженерних розрахунків, можуть бути використані результати розрахункових і експериментальних досліджень, наведені в роботах [10; 11]. Однак невизначеними є дані щодо зазначеного співвідношення для пасивних систем вогнезахисту конкретних торгових марок і сталевих конструкцій, які мають широкий діапазон змінювання їхніх параметрів (коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості). Тому є підстави вважати за актуальні дослідження, спрямовані на виявлення впливу параметрів сталевих конструкцій на зазначене співвідношення для систем вогнезахисту, створених із пасивних вогнезахисних матеріалів, – штукатурок, плит, панелей і матів [5; 6].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Незахищені сталеві конструкції зберігають свою несучу здатність (за критичної температури 500 °C) протягом проміжку часу до 25 хвилин для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 та 10 і 35 хвилин за температурними режимами вуглеводневої і

зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 [12; 13]. Враховуючи те, що тривалість вогневого впливу на ці конструкції під час пожежі згідно з EN 13501-2 може бути більшою, для сталевих конструкцій зазвичай використовують пасивні й реактивні системи вогнезахисту [14; 15].

Пасивні системи вогнезахисту часто містять водонасичені наповнювачі, такі як гіпс, вермикуліт і перліт [4; 5]. Інтенсивне випаровування цієї води під час вогневого впливу уповільнює нагрівання металевого елемента сталеві конструкції. Завдяки цьому такі системи вогнезахисту, на відміну від реактивних систем [16], забезпечують збереженість несучої здатності сталевих конструкцій протягом тривалого часу вогневого впливу, який може досягати 240 хвилин і більше [12; 14; 15].

В роботах [12; 13; 17; 18] наведено дані щодо співвідношення проміжків часу збереженості несучої здатності (вогнестійкості) захищених сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі, які подано в EN 1363-1 і EN 1363-2. Зокрема, в них розглянуто параметри, які впливають на це співвідношення, і зазначено, що різниця між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі і його значенням за стандартного температурного режиму може досягати 58 %, а за температурного режиму зовнішньої пожежі й стандартного температурного режиму – 108 %.

Відповідно до EN 13381-4 величина необхідної мінімальної товщини системи вогнезахисту сталеві конструкції залежить від її коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури, нормованого проміжку часу збереженості вогнестійкості і властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу. В роботах [10; 11; 19] наведено дані щодо співвідношення цієї товщини за різними номінальними температурними режимами пожежі згідно з EN 1363-1 і EN 1363-2. Зокрема, в них зазначено, що різниця між значеннями цієї

товщини, отриманими для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі й стандартного температурного режиму, може досягати 214 %, а за температурного режиму зовнішньої пожежі й стандартного температурного режиму – 65 %. Ця різниця зменшується із підвищенням коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу та коефіцієнта поперечного перерізу і збільшується із підвищенням критичної температури. Із підвищенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за температурного режиму вуглеводневої пожежі різниця зменшується, а за температурного режиму зовнішньої пожежі вона збільшується [10].

Підсумовуючи, слід зазначити, що наведені вище результати досліджень дозволяють оцінювати співвідношення щодо необхідної мінімальної товщини систем вогнезахисту сталевих конструкцій за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі і стандартного температурного режиму. Проте, в більшій частині, ці результати містять залежності цього співвідношення від коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості, які отримано розрахунковим методом для гіпотетичних вогнезахисних матеріалів, що мають сталі значення коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності [10]. Водночас теплофізичні властивості реалістичних вогнезахисних матеріалів не є сталими і залежать від низки параметрів, зокрема від температури [20]. Певні експериментально-розрахункові дані щодо цього співвідношення визначено для обмеженої кількості реактивних вогнезахисних матеріалів [11; 19]. Тому є підстави вважати, що недостатня визначеність співвідношення щодо необхідної мінімальної товщини пасивних систем вогнезахисту сталевих конструкцій за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 і стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 обумовлює

необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

Формулювання цілей дослідження. За мету дослідження ставилося виявлення залежностей співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини пасивної системи вогнезахисту певної торгової марки за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 і стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 від параметрів сталевих конструкцій – їхнього коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості.

Методи дослідження. Застосовано експериментальний метод визначення теплового стану зразків захищених сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму та розрахункові методи ідентифікації теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності, визначення температури захищених сталевих конструкцій у різні проміжки часу вогневого впливу шляхом розв'язання прямої задачі теплопровідності та розв'язання задачі оптимізації для визначення необхідної мінімальної товщини системи вогнезахисту.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження застосовано одношарову пасивну систему вогнезахисту (далі – вогнезахисне покриття) з вермикуліто-цементних плит «Ендотерм 210104» [3]. Для визначення співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини системи вогнезахисту за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 і за стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 застосовано метод, який наведено в роботі [21]. Цей метод засновано на положеннях EN 13381-4 і ДСТУ Б В.1.1-17 [22]. Його сутність полягає в експериментальному визначенні теплового стану навантажених і ненавантажених зразків захищених

сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму, визначенні за отриманими експериментальними даними щодо температури зразків теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу (далі – 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 табл. 1 наведено параметри експериментальних зразків – ненавантажених коротких колон заввишки 1000 мм, навантажених балок завдовжки 4700 мм і ненавантажених балок для порівняння завдовжки 1000 мм, для яких в експерименті визначено температуру $\theta_{a,exp}$ їхньої металевої поверхні (під шаром вогнезахисного покриття) у різні проміжки часу вогневого впливу за стандартного температурного режиму.

Таблиця 1 – Параметри експериментальних зразків

№ зразка	Вид конструкції	Типорозмір профілю	Коефіцієнт поперечного перерізу $A_p/V, \text{м}^{-1}$	Товщина покриття d_p , мм
1	Коротка колона	IPE 200	226,77	60,40
2	Коротка колона	IPE 200	226,77	40,20
3	Коротка колона	HEA 200	158,68	60,80
4	Коротка колона	HEA 200	158,68	40,40
5	Коротка колона	HEA 200	158,68	19,30
6	Коротка колона	HEA 300	113,43	40,80
7	Коротка колона	HEA 300	113,43	20,80
8	Коротка колона	HEB 300	86,74	20,30
9	Коротка колона	HEB 450	73,73	40,20
10	Коротка колона	HEM 280	53,13	19,8
11	Навантажена балка	IPE 400	122,35	20,2
12	Навантажена балка	IPE 400	122,35	41,0
13	Балка для порівняння	IPE 400	122,35	20,0
14	Балка для порівняння	IPE 400	122,35	40,8

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. Порівнюючи показники щодо проміжків часу t_{exp} на навантажених балках (зразки № 11, № 12) з показниками, отриманими з використанням ненавантажених балок (зразки № 13, № 14), згідно з додатком D EN 13381-4 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 також

подано в табл. 2. Із використанням даних щодо температури $\theta_{a,exp}$, отриманих для коротких колон (зразків № 1–10), 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 [22], додатку П.2 ДСТУ-Н Б В.2.6-211 [23], додатку Е EN 13381-4 і роботах [21; 24], визначено теплофізичні властивості застосовного в експериментальних зразках вогнезахисного покриття – його коефіцієнт теплопровідності λ_p і питому об’ємну теплоємність $c_p \rho_p$ залежні від температури.

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

Критична температура θ_{cr} , °C	350	400	450	500	550	600	650	700
№ зразка	Проміжки часу t_{exp}/t_c , хв							
1	213/213	224/224	236/236	249/249	261/261	272/268	286/272	–
2	108/108	115/115	123/123	131/131	139/139	148/142	159/146	173/151
3	239/239	252/252	266/266	281/281	295/295	–	–	–
4	120/120	129/129	138/138	148/148	158/157	169/162	182/167	197/173
5	51/51	56/56	60/59	65/63	71/66	78/70	85/74	95/85
6	142/142	153/153	165/165	178/178	191/190	206/197	224/204	243/211
7	66/66	73/73	81/80	90/85	99/91	110/97	122/104	137/112
8	73/73	82/82	91/90	101/96	112/102	124/109	138/117	154/127
9	165/165	180/180	196/196	213/213	230/229	249/237	263/246	275/253
10	96/96	108/108	121/119	134/127	149/135	165/144	–	–
11	70	75	80	85	90	96	104	113
12	149	159	167	175	181	187	193	199
13	65	73	80	88	98	109	122	137
14	137	148	159	170	182	195	210	226

При цьому на першому етапі шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності із застосуванням комп'ютерної програми FRIEND [24] визначали такі значення λ_p і $c_p\rho_p$ у вузлових точках їхніх кусково-лінійних залежностей від температури, за яких середньоквадратичний відхил F розрахункових $\theta_{a,\text{calc}}$ від

експериментальних $\theta_{a,\text{exp}}$ значень температури коротких колон є мінімальний. Отримані результати щодо коефіцієнта теплопровідності λ_p і питомої об'ємної теплоємності $c_p\rho_p$ наведено в табл. 3 і 4. Для цього розв'язку величина відхилу F становить 10,7 °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)	0,543	0,156	0,259	0,425
Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{p,c}$, Вт/(м·°C)	0,546	0,159	0,262	0,428

Таблиця 4 – Значення $c_p\rho_p$ у вузлових точках

Номер вузлової точки i	1	2	3	4	5	6
Температура вузлової точки $\theta_{p,i}$, °C	0	95	98	104	110	1200
Питома об'ємна теплоємність $c_p\rho_p$, МДж/(м³·°C)	1,0	1,0	80,0	80,0	1,0	1,0

На другому етапі визначали прийнятність отриманого розв'язку, виходячи з таких вимог (критеріїв прийнятності) [6]:

а) для кожної короткої колони жоден розрахунковий 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

для кожної короткої колони, 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 для кожної короткої колони.

Ураховуючи те, що отриманий розв'язок оберненої задачі теплопровідності не задовольнив вимозі б), було 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 -ій вузловій точці за температури $\theta_{p,i}$;

$\lambda_p(\theta_{p,i})$ – значення коефіцієнта теплопровідності в i -ій вузловій точці за температури $\theta_{p,i}$, визначене шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності;

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

i – номер вузлової точки, $i = 1, 2, \dots, n$, де n – кількість вузлових точок (відповідно до табл. 3 $n = 4$);

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 було застосовано ітераційну процедуру, яку наведено в [21]. Отримані кориговані значення коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,c}$ у вузлових точках наведено в табл. 3.

Користуючись коригованими величинами коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,c}$ і значеннями питомої об'ємної теплоємності $c_p \rho_p$, які подано в табл. 3, 4, за процедурою, наведеною в [10; 21], визначали значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за стандартного температурного режиму та температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожеж для сталевих конструкцій, які мають широкий

діапазон їхніх параметрів – коефіцієнта поперечного перерізу $((A_p/V)_{\min} = 40 \text{ м}^{-1}; (A_p/V)_{\text{med}} = 150 \text{ м}^{-1}; (A_p/V)_{\max} = 300 \text{ м}^{-1})$, критичної температури $(\theta_{cr,\min} = 350 \text{ }^\circ\text{C}; \theta_{cr,\text{med}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}; \theta_{cr,\max} = 700 \text{ }^\circ\text{C})$ і проміжку часу збереженості вогнестійкості $(t_{fr,\min} = 30 \text{ хв}; t_{fr,\text{med}} = 120 \text{ хв}; t_{fr,\max} = 240 \text{ хв})$. За формулами (3) і (4) розраховано відсоткові різниці (далі – різниці) між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожеж і значеннями цієї товщини за стандартного температурного режиму. Отримані розрахункові дані подано в табл. 5, 6. Прочерки в табл. 6 пов'язані з тим, що для температурного режиму зовнішньої пожежі сталева конструкція не може досягнути температури $700 \text{ }^\circ\text{C}$ через те, що максимальне значення температури газового середовища для цього режиму згідно з EN 1363-2 складає $680 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

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

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

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

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

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

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

$A_p/V,$ m^{-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	113	223	—	26,5	33,0	49,3	8,43	11,4	12,5
150	73,8	99,3	239	19,0	23,6	33,3	7,39	7,84	9,13
300	50,0	75,2	154	14,9	18,7	23,8	7,18	7,68	8,49

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

$A_p/V,$ m^{-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	-29,1	-51,2	—	-34,6	-52,8	—	-37,8	-53,7	—
150	-9,02	-27,4	—	-21,0	-31,6	—	-25,0	-35,1	—
300	-5,63	-22,0	—	-19,8	-26,7	—	-22,5	-30,9	—

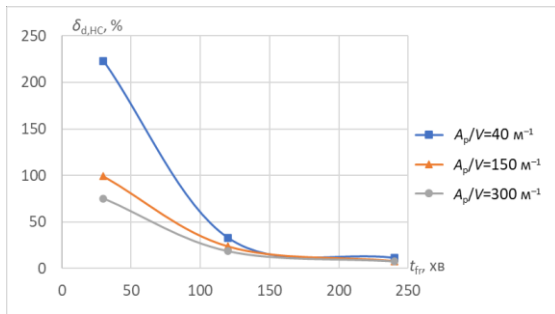
Із аналізу даних, наведених в табл. 5, можна зазначити, що різниця $\delta_{d,HC}$ між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за температурного режиму вуглеводневої пожежі і стандартного температурного режиму залежить від коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V , критичної температури θ_{cr} та проміжку часу збереженості вогнестійкості t_{fr} і змінюється в діапазоні від 7,18 % до 239 %. Із підвищенням t_{fr} та A_p/V різниця зменшується. Підвищення θ_c призводить до її збільшення. Найбільший вплив на величину різниці має проміжок часу t_{fr} . Найбільші значення (від 50,0 % до 239 %) різниця має для проміжку часу 30 хв, найменші (від 7,18 % до 12,5 %) – для 240 хв. Вплив коефіцієнта поперечного перерізу і критичної температури на різницю є значним для проміжку часу 30 хв, а з підвищенням цього проміжку часу він слабкіший. Зокрема, за $\theta_{cr,med} = 500$ °C із підвищенням проміжку часу від 30 хв до 240 хв різниця зменшується: від 223 % до 11,4 % – за $(A_p/V)_{min} = 40$ м⁻¹; від 99,3 % до 7,84 % – за $(A_p/V)_{med} = 150$ м⁻¹; від 75,2 % до 7,68 % – за $(A_p/V)_{max} = 300$ м⁻¹ (рис. 1а). За $t_{fr,med} = 120$ хв із підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу від 40 м⁻¹ до 300 м⁻¹ різниця зменшується: від 26,5 % до 14,9 % – за $\theta_{cr,min} = 350$ °C; від 33,0 % до 18,7 % – за $\theta_{cr,med} = 500$ °C; від 49,3 % до 23,8 % – за $\theta_{cr,max} = 700$ °C (рис.

1б). За $(A_p/V)_{med} = 150$ м⁻¹ із підвищенням критичної температури від 350 °C до 700 °C різниця збільшується: від 73,8 % до 239 % – за $t_{fr,min} = 30$ хв; від 19,0 % до 33,3 % – за $t_{fr,med} = 120$ хв; від 7,39 % до 9,13 % – за $t_{fr,max} = 240$ хв (рис. 1в).

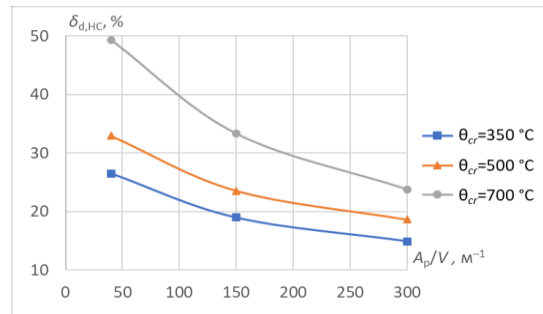
Із аналізу даних, поданих в табл. 6, випливає, що різниця $\delta_{d,ef}$ між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за температурного режиму зовнішньої пожежі і стандартного температурного режиму, також як і різниця $\delta_{d,HC}$ залежить від коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V , критичної температури θ_{cr} та проміжку часу збереженості вогнестійкості t_{fr} і змінюється в діапазоні від -5,63 % до -53,7 %. Із підвищенням t_{fr} та θ_{cr} і зменшенням A_p/V різниця $\delta_{d,ef}$ (за модулем) збільшується. Зокрема, за $\theta_{cr,med} = 500$ °C із підвищенням проміжку часу від 30 хв до 240 хв величина різниці збільшується: від 51,2 % до 53,7 % – за $(A_p/V)_{min} = 40$ м⁻¹; від 27,4 % до 35,1 % – за $(A_p/V)_{med} = 150$ м⁻¹; від 22,0 % до 30,9 % – за $(A_p/V)_{max} = 300$ м⁻¹ (рис. 2а). За $t_{fr,med} = 120$ хв із підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу від 40 м⁻¹ до 300 м⁻¹ величина різниці зменшується: від 34,6 % до 19,8 % – за $\theta_{cr,min} = 350$ °C; від 52,8 % до 26,7 % – за $\theta_{cr,med} = 500$ °C (рис. 2б). За $(A_p/V)_{med} = 150$ м⁻¹ із підвищенням критичної температури від 350 °C до 500 °C величина різниці збільшується: від 9,02 % до 27,4 % – за

$t_{fr,min} = 30$ хв; від 21,0 % до 31,6 % – за $t_{fr,med}$
 $= 120$ хв; від 25,0 % до 35,1 % – за $t_{fr,max} =$

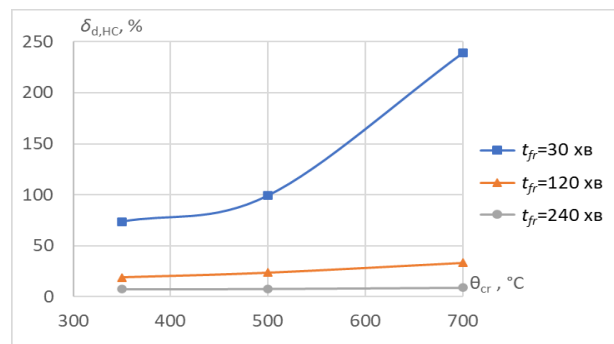
240 хв (рис. 2в).



а

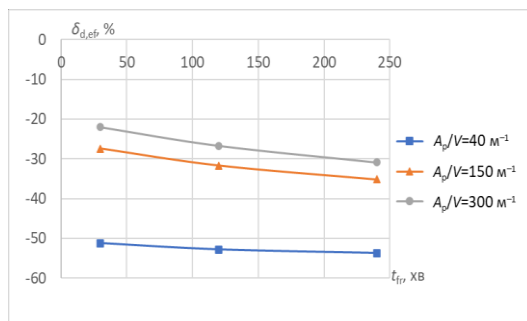


б

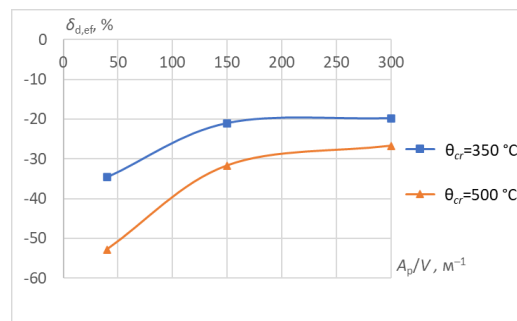


в

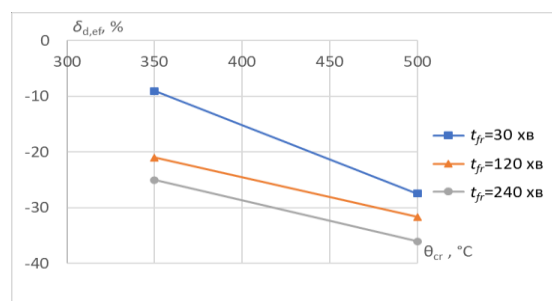
Рисунок 1 – Залежності різниці $\delta_{d,HC}$ від проміжку часу t_{fr} (а), коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V (б) і критичної температури θ_{cr} (в)



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)

За отриманими результатами впливає, що величина різниці між необхідною мінімальною товщиною пасивного вогнезахисного покриття «Ендотерм 210104» 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 зменшується, а з підвищенням критичної температури збільшується. На величину цієї різниці також впливає значення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій. Підвищення цього проміжку часу за температурного режиму вуглеводневої пожежі призводить до суттєвого зменшення величини різниці. За температурного режиму зовнішньої пожежі з підвищенням проміжку часу збереженості вогнестійкості величина різниці збільшується, але вплив цього проміжку часу на різницю не такий значний, як за температурного режиму вуглеводневої пожежі. Такий вплив проміжку часу збереженості вогнестійкості на величину зазначеної різниці обумовлений відмінністю у рівнях теплового впливу на сталеву конструкцію, які мають місце за умов різних номінальних температурних режимів пожежі [10].

Отримані результати дослідження можуть вважатися за доцільні з практичної точки зору, тому що дозволяють обґрунтовано підходити до оцінювання необхідної мінімальної товщини пасивного вогнезахисного покриття, призначеного для сталевих конструкцій, для умов вогневого впливу за номінальними температурними режимами пожежі, які відмінні від стандартного. З теоретичної точки зору вони дозволяють стверджувати про визначеність впливу параметрів сталевих конструкцій на співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини пасивного вогнезахисного покриття за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі і стандартного температурного режиму, що

є певними перевагами проведеного дослідження. Однак неможливо не відмітити, що результати цього дослідження отримано тільки для одного пасивного вогнезахисного покриття певної торгової марки. Зазначене може призвести до наявності відмінностей в отриманих результатах стосовно співвідношення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття за різними номінальними температурними режимами пожежі.

Ця невизначеність накладає певні обмеження на застосування здобутих результатів, що може трактуватися, як недоробки проведеного дослідження. Неможливість усунути зазначені обмеження в межах цього дослідження зумовлює потенційно цікавий напрямок для подальших досліджень. Вони можуть бути орієнтовані на виявлення впливу параметрів сталевих конструкцій на зазначене співвідношення щодо систем вогнезахисту, створених із таких пасивних вогнезахисних матеріалів, як штукатурки, панелі та мати, а також на визначення спрощених залежностей для цього співвідношення, які прийнятні для інженерних розрахунків.

Висновки та напрями подальших досліджень. Проведеним дослідженням виявлено залежності співвідношення (відсоткової різниці) між значеннями необхідної мінімальної товщини пасивного вогнезахисного покриття, створеного з вермикуліто-цементних плит торгової марки «Ендотерм 210104», за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 і стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 від параметрів сталевих конструкцій – їхнього коефіцієнта поперечного перерізу, критичної температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості.

Встановлено, що для діапазонів змінювання параметрів сталевих конструкцій, які становлять для коефіцієнта поперечного перерізу від 40 м^{-1} до 300 м^{-1} , для критичної температури від $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і для

проміжку часу збереженості вогнестійкості від 30 хв до 240 хв, величина цієї різниці за температурного режиму вуглеводневої пожежі змінюється від 7 % до 239 %, а за температурного режиму зовнішньої пожежі – від 6 % до 54 %. Величина різниці, як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі так і зовнішньої пожежі, з підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу зменшується, а з підвищенням критичної температури збільшується. За температурного режиму вуглеводневої пожежі підвищення проміжку часу збереженості вогнестійкості призводить до суттєвого зменшення величини різниці. За температурного режиму зовнішньої пожежі з підвищенням цього проміжку часу величина різниці збільшується, проте вплив проміжку часу на різницю не такий значний, як за температурного режиму вуглеводневої пожежі. Зокрема, за

критичної температури 500 °C і коефіцієнта поперечного перерізу 150 м⁻¹ із підвищенням проміжку часу від 30 хв до 240 хв величина різниці зменшується від 99 % до 8 % за температурного режиму вуглеводневої пожежі та збільшується від 27 % до 35 % за температурного режиму зовнішньої пожежі.

Визначено напрями подальших досліджень, які орієнтовані на виявлення впливу параметрів сталевих конструкцій на співвідношення необхідної мінімальної товщини за температурними режимами вуглеводневої та зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 і стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 щодо систем вогнезахисту, створених із таких пасивних вогнезахисних матеріалів, як штукатурки, панелі та мати, а також на визначення спрощених залежностей для цього співвідношення, які прийнятні для інженерних розрахунків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 CEN. 79 p.
2. Yellow book: Fire protection for structural steel in buildings 4 edition. Association for Specialist Fire Protection. 2013. <https://asfp.org.uk>.
3. Калафат К., Вахитова Л. Аналитический обзор средств огнезащиты стальных конструкций 2021–2022. Украинский центр стального производства, 2022. 230 с.
4. EAD 350140-00-1106 Renderings and rendering kits intended for fire resistant applications. EOTA 2017. 48 p.
5. EAD 350142-00-1106 Fire protective board, slab and mat products and kits. EOTA 2017. 60 p.
6. EN 13381-4:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 4: Applied passive protection to steel members. European committee for standardization. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 83 p.
7. EN 1363-1:2020 Fire resistance tests – Part 1: General Requirements. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 54 p.
8. EN 1991-1-2:2002/AC:2013 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. European committee for standardization. Central secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 61 p.
9. EN 1363-2:1999 Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999. CEN. 16 p.
10. Новак С., Добростан О., Пустовий М. Вплив температурного режиму пожежі на необхідну мінімальну товщину вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2022. № 2 (14). С. 5–20.
11. Новак С., Пустовий М. Співвідношення необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2024. № 2 (14). С. 63–74.
12. Gravit M., Dmitriev I., Shcheglov N., Radaev A. Oil and gas structures: Forecasting the fire resistance of steel structures with fire protection under hydrocarbon fire conditions. Fire. 2024. Vol. 7. P. 173–196. <https://doi.org/10.3390/fire7060173>.
13. Новак С., Добростан О., Пустовий М. Вплив температурного режиму пожежі на проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2023. № 1 (15). С. 18–31.
14. Randaxhe J., Popa N., Vassart O., Tondini N. Development of a plug-and-play fire protection system for steel columns. Fire Saf. J. 2021. Vol. 121. P. 103272.
15. Diaconu B., Cruceru M., Anghelescu L. Fire retardance methods and materials for phase change materials: performance, integration methods, and applications — A literature review. Fire. 2023. Vol. 6. P. 175.
16. EAD 350402-00-1106 Reactive coatings for fire protection of steel elements. EOTA 2017. 32 p.
17. Fireproofing for hydrocarbon fire exposures//GAPS Guidelines. Publication of Global Asset Protection Services LLC. 2000. <https://www.appliedbuildingtech.com/system/files/gap2.5.1.fireproofingforhydrocarbonexposures.pdf>.
18. AXA XL Risk consulting. GAPS© 2020. Available online: <https://axaxl.com/-/media/axaxl/files/pdfs/prc-guidelines/prc-2/prc251fireproofingforhydrocarbonfireexposuresv1.pdf>.

19. Ковальов А., Зобенко Н. Методика попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2016. № 1 (1). С. 59–65.
20. Круковский П., Новак С., Поклонский В., Еременко С., Фролов Г. *Оценка огнестойкости металлических строительных конструкций и огнезащитной способности покрытий (расчетно-экспериментальный подход)*: коллективная монография. Киев: ТОВ "Франко Пак". 2021. 148 с.
21. Пустовий М., Маладіка І., Новак С. Оцінювання співвідношення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2024. Том 8, № 2. С. 104–120.
22. ДСТУ Б В.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ) Захист від пожежі. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності. Київ: *Мінрегіонбуд України*. 2008. 65 с.
23. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ: *Мінрегіон України*. 2016. 111 с.
24. Krukovsky P. Concerning a possibility of solution of inverse and optimization heat-transfer and fluid flow problems using PHOENICS and software FRIEND. *The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics & its applications*. 1996. Vol. 9. № 4. P. 516–532.

REFERENCES

1. EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 CEN. 79 p. [in English].
2. Yellow book: Fire protection for structural steel in buildings 4 edition. Association for Specialist Fire Protection. 2013. <https://asfp.org.uk> [in English].
3. Kalafat K., Vakhitova L. Analiticheskii obzor sredstv ognезashchiti stalnikh konstruktssii 2021–2022 [Analytical review of fire protection means for steel structures 2021–2022]. *Ukrainskii tsentr stalnogo proizvodstva*. 2022. 200 s. [in Russian].
4. EAD 350140-00-1106 Renderings and rendering kits intended for fire resistant applications. EOTA 2017. 48 p. [in English].
5. EAD 350142-00-1106 Fire protective board, slab and mat products and kits. EOTA 2017. 60 p. [in English].
6. EN 13381-4:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 4: Applied passive protection to steel members. European committee for standardization. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 83 p. [in English].
7. EN 1363-1:2020 Fire resistance tests – Part 1: General Requirements. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 54 p. [in English].
8. EN 1991-1-2:2002/AC:2013 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. European committee for standardization. Central secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 61 p. [in English].
9. EN 1363-2:1999 Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999. CEN. 16 p. [in English].
10. Novak S., Dobrostan O., Pustovyi M. Vplyv temperaturnoho rezhymu pozhezhi na neobkhidnu minimalnu tovshchynu vohnezakhysnykh pokryttiv dlia stalevykh konstruktssii. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2022. № 2 (14). S. 5–20 [in Ukrainian].
11. Novak S., Pustovyi M. Spivvidnoshennia neobkhidnoi minimalnoi tovshchyny vohnezakhysnykh pokryttiv stalevykh konstruktssii za ryznymy nominalnymy temperaturnymy rezhymamy pozhezhi. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2024. № 2 (14). S. 63–74 [in Ukrainian].
12. Gravit M., Dmitriev I., Shcheglov N., Radaev A. Oil and gas structures: Forecasting the fire resistance of steel structures with fire protection under hydrocarbon fire conditions. *Fire*. 2024. Vol. 7. P. 173–196. <https://doi.org/10.3390/fire7060173> [in English].
13. Novak S., Dobrostan O., Pustovyi M. Vplyv temperaturnoho rezhymu pozhezhi na promizhok chasu zberezhenosti vohnestiiikosti stalevykh konstruktssii. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2023. № 1 (15). S. 18–31 [in Ukrainian].
14. Randaxhe J., Popa N., Vassart O., Tondini N. Development of a plug-and-play fire protection system for steel columns. *Fire Saf. J.* 2021. Vol. 121. P. 103272 [in English].
15. Diaconu B., Cruceru M., Angheliescu L. Fire retardance methods and materials for phase change materials: performance, integration methods, and applications — A literature review. *Fire*. 2023. Vol. 6. P. 175 [in English].
16. EAD 350402-00-1106 Reactive coatings for fire protection of steel elements. EOTA 2017. 32 p. [in English].
17. Fireproofing for hydrocarbon fire exposures//GAPS Guidelines. Publication of Global Asset Protection Services LLC. 2000. <https://www.appliedbuildingtech.com/system/files/gap2.5.1.fireproofingforhydrocarbonexposures.pdf> [in English].
18. AXA XL Risk consulting. GAPS© 2020. Available online: <https://axaxl.com/-/media/axaxl/files/pdfs/prc-guidelines/prc-2/prc251fireproofingforhydrocarbonfireexposuresv1.pdf> [in English].
19. Kovalov A., Zobenko N. Metodyka poperednoi otsinky vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttiv dlia stalevykh konstruktssii v umovakh temperaturnoho rezhymu vuhlevodnevoi pozhezhi. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2016. № 1 (1). S. 59–65 [in Ukrainian].
20. Krukovskij P., Novak S., Poklonskij V., Eremenko S., Frolov G. Ocenka ognestojkosti metallicheskich stroitel'nykh konstrukcij i ognезashhitnoj sposobnosti pokrytij (raschetno-eksperimental'nyj podkhod): kolektivnaya monografiya. Kiev: Izdatel'stvo TOV "Franko Pak". 2021. 148 s. [in Russian].
21. Pustovyi M., Maladyka I., Novak S. Otsiniuvannia spivvidnoshennia neobkhidnoi minimalnoi tovshchyny vohnezakhystu stalevykh konstruktssii za ryznymy nominalnymy temperaturnymy rezhymamy pozhezhi. *Nadzvychnaii sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia*. 2024. Том 8, № 2. S. 104–120 [in Ukrainian].
22. DSTU B V.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ) Zakhyst vid pozhezhi. Vohnezakhysni pokryttia dlia budivelnykh nesuchykh metalovykh konstruktssii. Metod vyznachennia vohnezakhysnoi zdatnosti. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. 2008. 65 s. [in Ukrainian].
23. DSTU-N B V.2.6-211:2016 Proektuvannia stalevykh konstruktssii. Rozrakhunok konstruktssii na vohnestiiikist. Kyiv: Minrehion Ukrainy. 2016. 111 s. [in Ukrainian].

24. Krukovsky P. Concerning a possibility of solution of inverse and optimization heat-transfer and fluid flow problems using PHOENICS and software FRIEND. The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics & its applications. 1996. Vol. 9. № 4. P. 516–532 [in English].

INFLUENCE OF STEEL STRUCTURE PARAMETERS ON THE RATIO OF THE REQUIRED MINIMUM THICKNESS OF PASSIVE FIRE PROTECTION SYSTEMS FOR DIFFERENT NOMINAL FIRE TEMPERATURE-TIME CURVES

S. Novak¹, M. Pustovyi²

¹*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Science of Ukraine, Ukraine*

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

KEYWORDS: ABSTRACT

fire resistance, fire protection coating, cross- sectional coefficient, critical temperature, time interval, fire protection system, temperature- time curve, thickness, ratio, steel structure	Insufficient certainty of data on the relationship between the values of the required minimum thickness of fire protection systems for steel structures at different nominal fire temperature-time curves restricts the use of these systems for conditional fire scenarios that involve fire exposure that differs from the standard temperature-time curve specified in EN 1363-1. The study was aimed at identifying the dependencies between the values of the required minimum thickness of a passive fire protection system 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 on the parameters of steel structures – their cross-sectional coefficient, critical temperature and fire resistance retention time. According to the method based on the provisions of EN 13381-4 and DSTU B V.1.1-17, the above ratio (percentage difference) was determined for a passive fire protection coating made of vermiculite-cement boards of the Endotherm 210104 trademark for steel structures with the following parameters: cross-sectional coefficient 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 240 min. It was found that the magnitude of this difference, depending on the parameters of the steel structure, varies from 7 % to 239 % under the temperature-time curve of a hydrocarbon fire, and from 6 % to 54 % under the temperature-time curve of an external fire. For both the conditions of fire exposure at the temperature-time curve of a hydrocarbon fire and an external fire, the difference decreases with an increase in the cross-sectional coefficient, and increases with an increase in the critical temperature. In the temperature-time curve of a hydrocarbon fire, an increase in the time interval of fire resistance preservation leads to a significant decrease in the value of the difference. In the temperature-time curve of an external fire, the difference increases with the increase of this time interval, but the effect of the time interval on the difference is not as significant as in the temperature-time curve of a hydrocarbon fire.
--	--