

УДК 614.841.45

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖІ НА ПРОМІЖОК ЧАСУ ЗБЕРЕЖЕНОСТІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1.18-31>

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:

04.04.2023

Пройшла рецензування:

12.04.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогнезахист, коефіцієнт теплопровідності, критична температура сталі, температурний режим, проміжок часу збереженості вогнестійкості, сталева конструкція, теплофізичні властивості.

АНОТАЦІЯ

Дослідження присвячене оцінюванню співвідношення між значеннями проміжку часу збереженості вогнестійкості захищених сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі, та значеннями цього проміжку часу для стандартного температурного режиму. За мету ставилось виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на проміжок часу збереженості вогнестійкості таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, для широких діапазонів параметрів цих конструкцій. Розрахунковим методом, який ґрунтується на розв'язуванні прямої одновимірної задачі теплопровідності, визначено дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості таких сталевих конструкцій для температурних режимів вуглеводневої та зовнішньої пожежі і дані щодо різниці між цими отриманими значеннями зі значеннями такого ж проміжку часу для стандартного температурного режиму. Встановлено, що для діапазону параметрів сталевих конструкцій, що оцінено, проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі змінюється в діапазоні від 12,5 хв до 219,0 хв, який є вужчим за діапазон для стандартного температурного режиму, що становить від 30 хв до 240 хв. Для температурного режиму зовнішньої пожежі цей діапазон складає від 33,3 хв до 500,1 хв, і він ширший, ніж для стандартного температурного режиму. Визначено, що різниця між значеннями проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій, отриманими для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, і значеннями такого ж проміжку часу за стандартного температурного режиму змінюється в діапазоні від -8,8% до -58,3%, а така ж різниця для температурного режиму зовнішньої пожежі – в діапазоні від 11,0% до 108,4%. З'ясовано, що на величину цієї різниці значно впливає значення проміжку часу збереженості вогнестійкості за стандартного температурного режиму, щодо якого цю різницю визначають. Закономірним є те, що з підвищенням цього проміжку часу ця різниця для температурного режиму вуглеводневої пожежі зменшується (за модулем), а для температурного режиму зовнішньої пожежі вона збільшується. Встановлено також вплив коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу, коефіцієнта поперечного перерізу і критичної температури сталі на величину цієї різниці.

Постановка проблеми. Відповідно до національної нормативної бази України загальні вимоги до вогнестійкості

будівельних конструкцій надано в ДБН В 1.1-7 [1]. У цих будівельних нормах наведено мінімальні класи вогнестійкості

будівельних конструкцій для будівель різних ступенів вогнестійкості. Зокрема, висунуто вимоги до мінімального класу вогнестійкості для балок (від R 15 до R 60) і колон (від R 15 до R 150) для умов вогневого впливу на них за стандартного температурного режиму [2]. Згідно з цими вимогами здійснюють вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій, що має забезпечити збереженість їхньої вогнестійкості протягом проміжку часу вогневого впливу, який є не меншим за нормоване значення проміжку часу, зазначене в класі вогнестійкості цієї конструкції, наприклад 60 хв для класу R 60. Водночас фактична товщина вогнезахисту має бути не меншою мінімальної товщини вогнезахисту, необхідної для забезпечення нормованого класу вогнестійкості конструкції.

Для сталевих конструкцій без огорожувальної функції, таких як балки і колони, за методами, наведеними в EN 13381-4 [3] і EN 13381-8 [4], визначають залежності між проміжком часу збереженості їхньої вогнестійкості, товщиною їхнього вогнезахисту та іншими параметрами сталевих конструкцій, оснащених пасивними і реактивними системами вогнезахисту. Ці залежності встановлюють для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму [2]. В той же час положення, наведені в ДБН В 1.1-7 [1], Єврокод 1 [5], Єврокод 3 [6] і національному стандарті [7], передбачають встановлення вимог до вогнестійкості сталевих конструкцій за іншими, ніж стандартний, номінальними температурними режимами – за режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі [8]. Однак конкретних вимог до проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за цими альтернативними номінальними температурними режимами пожежі в чинних національних нормах не встановлено.

З аналізу рівнів теплового впливу на захищені сталеві конструкції, які спостерігаються в умовах різних номінальних температурних режимів

пожежі, наведеному в роботі [9], випливає, що сталеві конструкції з товщиною вогнезахисту, яка відповідає необхідній мінімальній товщині, визначеній для стандартного температурного режиму, будуть мати зменшений щодо стандартного режиму проміжок часу збереженості вогнестійкості для режиму вуглеводневої пожежі й збільшений – для режиму зовнішньої пожежі. Проте даних щодо співвідношення між значеннями цього проміжку, визначеними для різних номінальних температурних режимів пожежі й широких діапазонів параметрів сталевих конструкцій (теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури сталі і коефіцієнта поперечного перерізу конструкції) в джерелах інформації не наведено. Через це, зважаючи на необхідність оцінювання суттєвих експлуатаційних характеристик сталевих конструкцій для різних температурних режимів умовної пожежі, актуальним слід вважати дослідження, спрямоване на виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на проміжок часу збереженості їхньої вогнестійкості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій визначають за експериментальними або розрахунковими методами. Для таких сталевих конструкцій, як балки і колони, експериментальні методи наведено в EN 13381-4 [3], EN 13381-8 [4], EN 1365-3 [10], EN 1365-4 [11], а розрахункові методи – в EN 1993-1-2 [6] і ДСТУ-Н Б В.2.6-211 [7].

Результатами, отриманими за EN 13381-4 [3] і EN 13381-8 [4], є залежності між проміжком часу збереженості вогнестійкості й необхідною мінімальною товщиною вогнезахисту сталевих конструкцій, що мають профіль двотавру, або порожнистих конструкцій. Ці результати наведено в документах, які стосуються оцінки відповідності систем вогнезахисту, призначених для сталевих

конструкцій, серед яких протоколи випробувань і класифікації за вогнестійкістю, сертифікати, та в різних джерелах інформації. Наприклад, в аналітичних оглядах [12–13] застосовних в Україні у 2019–2022 рр. засобів вогнезахисту для сталевих балок і колон такі результати надано для шести пасивних систем вогнезахисту і п'ятнадцяти реактивних систем вогнезахисту. З аналізу наведених в цих оглядах даних випливає, що для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму для зазначених пасивних систем вогнезахисту діапазон проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій складає від 45 хв до 240 хв, а діапазон необхідної мінімальної товщини вогнезахисту – від 7 мм до 81 мм. Для реактивних систем вогнезахисту діапазон проміжку часу збереженості вогнестійкості вужчий, ніж для пасивних систем, і складає від 30 хв до 120 хв. Водночас значення необхідної мінімальної товщини реактивного вогнезахисту значно менші, ніж для пасивного вогнезахисту, і перебувають в діапазоні від 0,180 мм до 8,989 мм.

У роботі [14] наведено результати розрахункового оцінювання вогнестійкості в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму захищеної сталеві балки, на яку спирається бетонна плита перекриття, яке проведене за ДСТУ-Н Б В.2.6-211 [7]. Показано вплив товщини вогнезахисту на температурний стан сталеві балки для певного значення проміжку часу збереженості її вогнестійкості.

За результатами дослідження, виконаного в роботі [15], для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму визначено розрахункові залежності між проміжком часу збереженості вогнестійкості сталеві конструкції, необхідною мінімальною товщиною її вогнезахисту, коефіцієнтом поперечного перерізу і коефіцієнтом теплопровідності застосовних вогнезахисних матеріалів. Встановлено дані щодо співвідношення між значеннями

необхідної мінімальної товщини вогнезахисту, визначеними для одношарових і багатошарових систем вогнезахисту, призначених для сталевих конструкцій.

У роботі [16] наведено дані щодо співвідношення між проміжком часу досягнення різної критичної температури сталі, визначеним для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму, і проміжком часу досягнення критичної температури, отриманим за температурного режиму вуглеводневої пожежі. З'ясовано, що для незахищених сталевих конструкцій різниця у цих проміжках часу досягає 60%. Також показано, що для сталевих конструкцій, оснащених вогнезахисними матеріалами двох певних торговельних марок, проміжок часу досягнення критичної температури сталі за температурного режиму вуглеводневої пожежі менший (на 17–59%), ніж за стандартного температурного режиму.

Результати оцінювання теплового стану сталеві пластини завтовшки 5 мм з вогнезахисним покриттям «Amotherm Steel Wb» для різних умов вогневого впливу показують, що у разі товщини покриття 0,42 мм проміжок часу досягнення температури 500 °C за стандартного температурного режиму в 1,9 раза більший, ніж за температурного режиму вуглеводневої пожежі [17].

За результатами дослідження, проведеного в роботі [9], визначено розрахункові дані щодо необхідної мінімальної товщини одношарового вогнезахисту сталевих конструкцій для температурних режимів вуглеводневої та зовнішньої пожежі і дані щодо різниці між цими отриманими значеннями товщини з необхідною мінімальною товщиною, встановленою для стандартного температурного режиму. Показано, що значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту, які отримано для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, більші (на 5,74–214%), ніж за стандартного температурного режиму, в той час як

значення цієї товщини для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі менші (на 7,52–64,7%), ніж за стандартного температурного режиму.

Наведені вище результати досліджень дають змогу обґрунтовано підходити до визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій для сценарію умовної пожежі у разі вогневого впливу за стандартного температурного режиму. В зазначених дослідженнях для цього вогневого впливу наведено залежності між цим проміжком часу і параметрами сталевих конструкцій з одношаровою і багатошаровою системами вогнезахисту, а також дані щодо значення цього проміжку часу для сталевих конструкцій, оснащених вогнезахисними матеріалами певних торговельних марок. Однак у результатах цих досліджень немає залежності та даних щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості захищених сталевих конструкцій, що визначені для широкого діапазону їхніх параметрів, які стосуються вогневого впливу за іншими номінальними температурними режимами пожежі. Також бракує даних щодо співвідношення значень цього проміжку часу, отриманих за різними номінальними режимами, для широких діапазонів параметрів сталевих конструкцій (теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури сталі і коефіцієнта поперечного перерізу конструкції). Така невизначеність щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості 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 проміжок часу збереженості вогнестійкості таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, для широких діапазонів параметрів цих конструкцій

(теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури сталі та коефіцієнта поперечного перерізу конструкції).

Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання:

- для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі визначити дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій з одношаровою системою вогнезахисту за такими параметрами цих конструкцій, за якими в роботі [15] оцінено необхідну мінімальну товщину вогнезахисту цієї системи за стандартного температурного режиму;

- для сталевих конструкцій з одношаровою системою вогнезахисту визначити різницю між значеннями проміжку часу збереженості їхньої вогнестійкості, отриманими для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі, і значеннями такого проміжку часу, визначеними за стандартного температурного режиму;

- для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі визначити залежності цієї різниці між проміжками часу збереженості вогнестійкості від параметрів сталевих конструкцій з одношаровою системою вогнезахисту (теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, товщини вогнезахисту, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості захищеної сталевих конструкції за стандартного температурного режиму).

Методи дослідження. Застосовано метод дослідження, складовими якого є обчислювальна процедура чисельного моделювання теплового стану сталевих конструкцій, оснащених вогнезахисним матеріалом із заданими теплофізичними властивостями, в умовах вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі, процедури аналізу, порівняння,

узагальнення та систематизації отриманих розрахункових даних. Для розрахунку теплового стану захищених сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу (температури сталі для різної тривалості вогневого впливу) використано одномірну двошарову математичну модель теплопровідності, яка складається із системи рівнянь, наведеної в [15]. Значення коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією і теплового випромінювання на обігрівній поверхні вогнезахисту, теплофізичні властивості сталі та інші параметри цієї моделі вибрані такими, як наведено в [5; 7]. Розв'язання математичної моделі й прямої задачі теплопровідності з визначення температури сталі виконано методом кінцевих різниць за неявною схемою апроксимації із використанням пакету прикладних програм FRIEND [18].

Виклад основного матеріалу дослідження. Процедуру визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції ($t_{fr,HC}$ – для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі і $t_{fr,ef}$ – для температурного режиму зовнішньої пожежі) з одношаровою системою вогнезахисту для певних значень теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу (його коефіцієнта теплопровідності λ_p і питомої теплоємності $c_p\rho_p$), товщини вогнезахисту $d_{p,min}$, критичної температури сталі θ_{cr} ,

коефіцієнта поперечного перерізу захищеної сталевій конструкції A_p/V для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі було вибрано такою.

Для температурних режимів вуглеводневої і зовнішньої пожежі і одношарової системи вогнезахисту з товщиною $d_{p,min}$ через розв'язання прямої задачі теплопровідності визначали проміжок часу ($t_{fr,HC}$ або $t_{fr,ef}$), за якого розрахункова температура сталевій конструкції $\theta_{a,cal}$ із коефіцієнтом поперечного перерізу A_p/V дорівнює критичній температурі сталі θ_{cr} . Цей розрахунок виконували для значень $d_{p,min}$, A_p/V , θ_{cr} і λ_p , наведених у табл. 1, і $c_p\rho_p = 500$ кДж/(м³·°C) ($c_p = 1000$ Дж/(кг·°C), $\rho_p = 500$ кг/м³). Зазначені таблиця і дані щодо питомої теплоємності вогнезахисного матеріалу взято з роботи [15]. У цій таблиці наведено дані щодо необхідної мінімальної товщини одношарової системи вогнезахисту $d_{p,min}$, отримані для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму за такими параметрами сталевій конструкції: $\theta_{cr,min} = 350$ °C; $\theta_{cr,med} = 500$ °C; $\theta_{cr,max} = 700$ °C; $t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв. Наявні прочерки в табл. 1 пов'язані з тим, що для зазначених параметрів (A_p/V , $\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$) сталева конструкція не потребує вогнезахисту.

Таблиця 1 – Дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисту, отримані для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму [15]

A_p/V , м ⁻¹	λ_p , Вт/(м·°C)	Необхідна мінімальна товщина вогнезахисту $d_{p,min}$ (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

Отримані шляхом розв'язання прямої задачі теплопровідності розрахункові значення проміжків часу $t_{fr,HC}$ та $t_{fr,ef}$

наведено в табл. 2 і 3. В цих таблицях $d_{p,min,30}$, $d_{p,min,90}$, $d_{p,min,240}$ – це значення товщини вогнезахисту, які дорівнюють

величинам необхідної мінімальної товщини вогнезахисту $d_{p,min}$ (див. табл. 1), отриманим для стандартного температурного режиму і проміжків часу вогневого впливу $t_{fr,min} = 30$ хв, $t_{fr,med} = 90$ хв, $t_{fr,max} = 240$ хв відповідно. Наявні прочерки в табл. 3 пов'язані з тим,

що для температурного режиму зовнішньої пожежі максимальне значення температури газового середовища складає $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ і через це для цього режиму сталева конструкція не може досягнути температури $\theta_{cr,max} = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 2 – Дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,HC}$, отримані для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі

A_p/V , м^{-1}	λ_p , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	Проміжок часу $t_{fr,HC}$ (у хв) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,240}$
40	0,02	17,4	14,5	—	68,3	65,5	58,9	219,0	219,0	218,2
150	0,02	18,9	17,1	12,8	69,4	67,0	61,1	219,0	219,0	217,4
300	0,02	19,3	17,6	13,4	70,2	67,5	61,8	217,7	217,4	217,3
40	0,2	17,2	14,4	—	68,5	66,3	58,8	217,9	217,8	217,6
150	0,2	19,0	17,1	12,7	70,3	67,4	61,3	216,9	216,4	215,5
300	0,2	19,8	17,7	13,4	71,2	68,3	62,1	218,1	216,0	214,5
40	2,0	16,9	14,2	—	68,7	65,1	58,5	215,3	214,7	214,7
150	2,0	18,9	16,9	12,5	70,2	66,9	61,5	215,8	214,1	213,4
300	2,0	19,3	17,4	13,3	70,6	67,7	61,7	215,7	214,2	212,3

Таблиця 3 – Дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,ef}$, отримані для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі

A_p/V , м^{-1}	λ_p , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	Проміжок часу $t_{fr,ef}$ (у хв) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,30}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,90}$	$\theta_{cr,min}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,med}$, $d_{p,min,240}$	$\theta_{cr,max}$, $d_{p,min,240}$
40	0,02	36,7	41,0	—	133,4	154,8	—	419,3	500,1	—
150	0,02	35,1	38,2	—	129,0	149,4	—	394,0	479,4	—
300	0,02	34,7	37,7	—	124,1	145,5	—	367,9	452,7	—
40	0,2	36,3	40,5	—	132,0	155,9	—	401,2	488,1	—
150	0,2	34,5	37,9	—	121,1	143,2	—	356,8	437,5	—
300	0,2	33,8	36,8	—	116,5	136,6	—	347,4	418,6	—
40	2,0	35,9	40,5	—	126,4	150,1	—	367,1	453,5	—
150	2,0	33,7	37,1	—	117,0	136,4	—	347,9	418,5	—
300	2,0	33,3	36,2	—	115,8	134,5	—	345,6	414,0	—

Із аналізу даних, наведених у табл. 2, 3, випливає, що для діапазону параметрів сталевих конструкцій, який оцінено, проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі змінюється від 12,5 хв до 219,0 хв, а для температурного режиму зовнішньої пожежі – від 33,3 хв до 500,1 хв. Для температурного режиму вуглеводневої пожежі діапазон проміжку часу збереженості вогнестійкості є вузьким, ніж для стандартного температурного режиму, який становить від 30 хв до 240 хв. Для

температурного режиму зовнішньої пожежі цей діапазон ширший, ніж для стандартного температурного режиму.

У табл. 4, 5 наведено дані щодо різниці між значеннями проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій ($t_{fr,HC}$ та $t_{fr,ef}$), отриманими для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі (див. табл. 2, 3), і значеннями такого ж проміжку часу t_{fr} ($t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв) для стандартного температурного режиму. Цю різницю розраховували за такими формулами:

$$\delta_{t,HC} = 100(t_{fr,HC} - t_{fr})/t_{fr}; \quad (1)$$

$$\delta_{t,ef} = 100(t_{fr,ef} - t_{fr})/t_{fr}, \quad (2)$$

де $\delta_{t,HC}$ – різниця між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції, отриманим для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, і значенням цього проміжку часу за стандартного температурного режиму, %;

$\delta_{t,ef}$ – різниця між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції, отриманим для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої

пожежі, і значенням цього проміжку часу за стандартного температурного режиму, %;

$t_{fr,HC}$ і $t_{fr,ef}$ – значення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції, отримані для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі й за температурного режиму зовнішньої пожежі, які наведено в табл. 2, 3, хв;

t_{fr} – значення проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму, яке наведене в табл. 1 ($t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв), хв.

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

A_p/V , M^{-1}	λ_p , Вт/(м·°С)	Різниця $\delta_{t,HC}$ (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	-42,0	-51,7	–	-24,1	-27,2	-34,6	-8,8	-8,8	-9,1
150	0,02	-37,0	-43,0	-57,3	-22,9	-25,6	-32,1	-8,8	-8,8	-9,4
300	0,02	-35,7	-41,3	-55,3	-22,0	-25,0	-31,3	-9,3	-9,4	-9,5
40	0,2	-42,7	-52,0	–	-23,9	-26,3	-34,7	-9,2	-9,3	-9,3
150	0,2	-36,7	-43,0	-57,7	-21,9	-25,1	-31,9	-9,6	-9,8	-10,2
300	0,2	-34,0	-41,0	-55,3	-20,9	-24,1	-31,0	-9,1	-10,0	-10,6
40	2,0	-43,7	-52,7	–	-23,7	-27,7	-35,0	-10,3	-10,5	-10,5
150	2,0	-37,0	-43,7	-58,3	-22,0	-25,7	-31,7	-10,1	-10,8	-11,1
300	2,0	-35,7	-42,0	-55,7	-21,6	-24,8	-31,4	-10,1	-10,8	-11,5

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

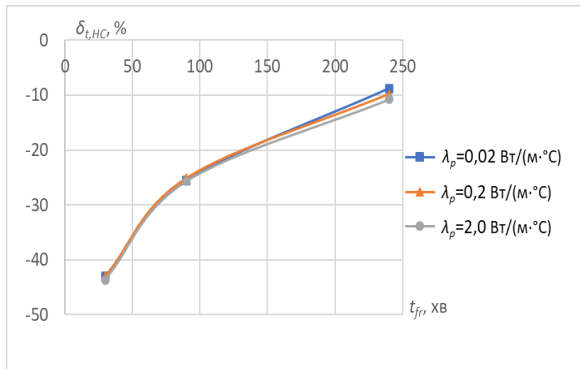
A_p/V , M^{-1}	λ_p , Вт/(м·°С)	Різниця $\delta_{t,ef}$ (у %) для:								
		$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$, $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$, $t_{fr,max}$
40	0,02	22,3	36,7	–	48,2	72,0	–	74,7	108,4	–
150	0,02	17,0	27,3	–	43,3	66,0	–	64,2	99,8	–
300	0,02	15,7	25,7	–	37,9	61,7	–	53,3	88,6	–
40	0,2	21,0	35,0	–	46,7	73,2	–	67,2	103,4	–
150	0,2	15,0	26,3	–	34,6	59,1	–	48,7	82,3	–
300	0,2	12,7	22,7	–	29,4	51,8	–	44,8	74,4	–
40	2,0	19,7	35,0	–	40,4	66,8	–	53,0	89,0	–
150	2,0	12,3	23,7	–	30,0	51,6	–	45,0	74,4	–
300	2,0	11,0	20,7	–	28,7	49,4	–	44,0	72,5	–

Із аналізу даних, наведених у табл. 4, випливає, що різниця $\delta_{t,HC}$ між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції $t_{fr,HC}$, отриманим для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, і значенням цього проміжку часу t_{fr} за стандартного температурного режиму залежить від коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу λ_p , коефіцієнта

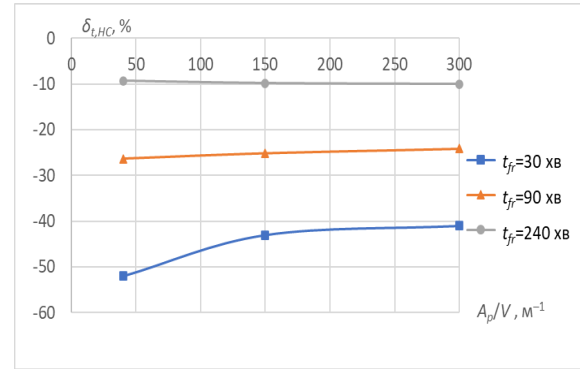
поперечного перерізу A_p/V , критичної температури сталі θ_{cr} і проміжку часу t_{fr} та змінюється в діапазоні від 8% до 58,3%. Найбільший вплив на її величину має значення проміжку часу t_{fr} , з підвищенням якого різниця $\delta_{t,HC}$ (за модулем) суттєво зменшується. Найбільші (за модулем) значення (від 34,0% до 58,3%) різниці $\delta_{t,HC}$ має для проміжку часу $t_{fr,min} = 30$ хв, найменші (від 8,8% до 11,5%)

– для $t_{fr,max} = 240$ хв. Вплив коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу λ_p на різницю $\delta_{t,HC}$ спостерігається тільки для проміжку часу t_{fr} , який складає 240 хв, проте він не суттєвий. Вплив коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V і критичної температури θ_{cr} на різницю $\delta_{t,HC}$ є значним для проміжку часу $t_{fr,min} = 30$ хв, а з підвищенням цього проміжку часу він слабкішає. Зокрема, за $(A_p/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$, $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ і підвищенні проміжку часу t_{fr} від 30 хв до 240 хв різниця $\delta_{t,HC}$ зменшується (за модулем): від 43,0% до 8,8% – для $\lambda_p = 0,02 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$; від 43,0% до 9,8% – для $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$; від 43,7% до

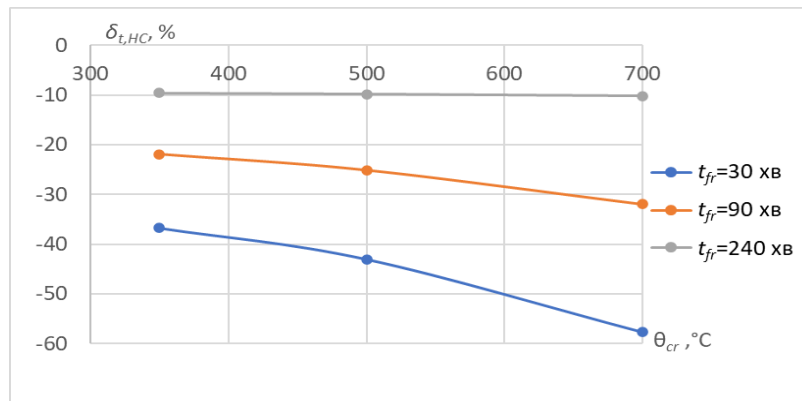
10,8% – для $\lambda_p = 2,0 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ (рис. 1а). За $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$, $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ і підвищенні коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V від 40 м^{-1} до 300 м^{-1} різниця $\delta_{t,HC}$ змінюється: від 52,0% до 41,0% – для $t_{fr,min} = 30$ хв; від 26,3% до 24,1% – для $t_{fr,med} = 90$ хв; від 9,3% до 10,0% – для $t_{fr,max} = 240$ хв (рис. 1б). За $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$, $(A_p/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$ і підвищенні критичної температури сталі θ_{cr} від $350 \text{ }^\circ\text{C}$ до $700 \text{ }^\circ\text{C}$ різниця $\delta_{t,HC}$ збільшується: від 36,7% до 57,7% – для $t_{fr,min} = 30$ хв; від 21,9% до 31,9% – для $t_{fr,med} = 90$ хв; від 9,6% до 10,2% – для $t_{fr,max} = 240$ хв (рис. 1в).



а



б



в

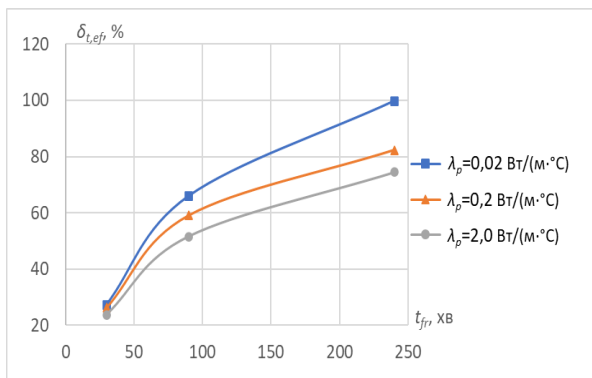
Рисунок 1 – Залежності різниці $\delta_{t,HC}$ від проміжку часу t_{fr} (а), коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V (б) і критичної температури сталі θ_{cr} (в)

Із аналізу даних, наведених у табл. 5, випливає, що різниця $\delta_{t,ef}$ між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій $t_{fr,ef}$, отриманим для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі, і значенням цього проміжку часу t_{fr} за стандартного температурного режиму, залежить від

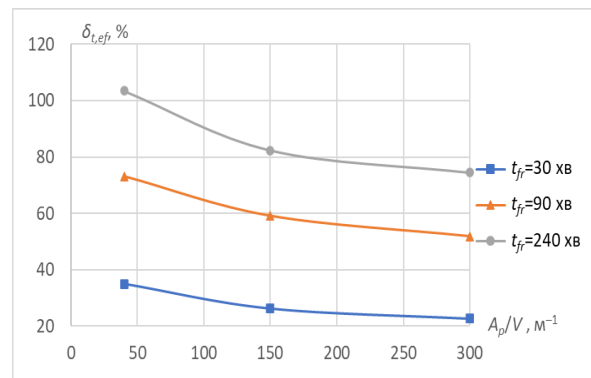
коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу λ_p , коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V , критичної температури сталі θ_{cr} і проміжку часу t_{fr} та змінюється в діапазоні від 11,0% до 108,4%. Найбільший вплив на її величину має значення проміжку часу t_{fr} , з підвищенням якого різниця $\delta_{t,ef}$ суттєво

збільшується. Найменші значення (від 11,0% до 36,7%) різниця $\delta_{t,ef}$ має для проміжку часу $t_{fr,min} = 30$ хв, найбільші (від 44,0% до 108,4%) – для $t_{fr,max} = 240$ хв. Із підвищенням λ_p , A_p/V і зі зменшенням θ_{cr} різниця $\delta_{t,ef}$ зменшується. Зокрема, за $(A_p/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$, $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ і підвищенні проміжку часу t_{fr} від 30 хв до 240 хв різниця $\delta_{t,ef}$ збільшується: від 27,3% до 99,8% – для $\lambda_p = 0,02 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$; від 26,3% до 82,3% – для $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$; від 23,7% до 74,4% – для $\lambda_p = 2,0 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ (рис. 2а). За $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$,

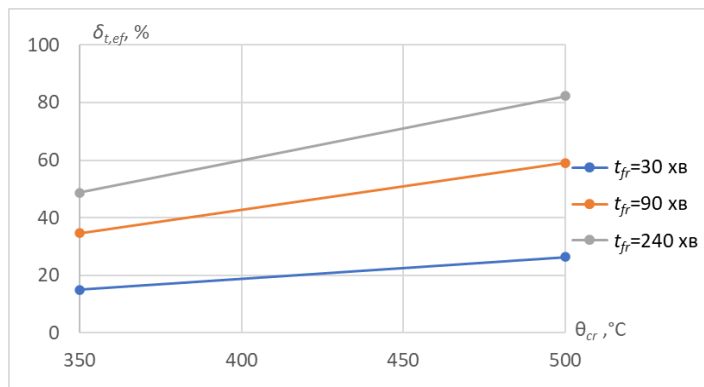
$\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ і підвищенні коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V від 40 м^{-1} до 300 м^{-1} різниця $\delta_{t,ef}$ зменшується: від 35,0% до 22,7% – для $t_{fr,min} = 30$ хв; від 73,2% до 51,8% – для $t_{fr,med} = 90$ хв; від 103,4% до 74,4% – для $t_{fr,max} = 240$ хв (рис. 2б). У разі $\lambda_p = 0,2 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$, $(A_p/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$ і підвищенні критичної температури сталі θ_{cr} від $350 \text{ }^\circ\text{C}$ до $500 \text{ }^\circ\text{C}$ різниця $\delta_{t,ef}$ збільшується: від 15,0% до 26,3% – для $t_{fr,min} = 30$ хв; від 34,6% до 59,1% – для $t_{fr,med} = 90$ хв; від 48,7% до 82,3% – для $t_{fr,max} = 240$ хв (рис. 2в).



а



б



в

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

Отримані дані щодо різниці між значеннями проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції з одношаровою системою вогнезахисту, визначені для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожеж, і значеннями такого проміжку часу за стандартного температурного режиму, які наведено в табл. 4, 5, дають змогу

стверджувати таке:

– ця різниця для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі має від'ємні значення (проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевій конструкції за температурного режиму вуглеводневої пожежі менший, ніж за стандартного температурного режиму), а для температурного режиму зовнішньої

пожежі – позитивні значення (цей проміжок часу за температурного режиму зовнішньої пожежі більший, ніж за стандартного температурного режиму);

– на величину цієї різниці як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі, значно впливає значення проміжку часу збереженості вогнестійкості t_{fr} за стандартного температурного режиму, щодо якого цю різницю визначають (див. формули (1), (2)). Закономірним є те, що з підвищенням проміжку часу t_{fr} для температурного режиму вуглеводневої пожежі різниця $\delta_{t,HC}$ зменшується, а для температурного режиму зовнішньої пожежі різниця $\delta_{t,ef}$ збільшується. Це зумовлено відмінністю у рівнях теплового впливу на захищену сталеву конструкцію, які спостерігаються за умов різних номінальних температурних режимів. Цей рівень визначається тепловим потоком на обігрівній поверхні конструкції, величина якого залежить від температури газового середовища θ_g , і проміжком часу вогневого впливу. Кількість теплоти, яка надходить до конструкції за певний проміжок часу вогневого впливу, прямо пропорційна площі під залежністю температури газового середовища θ_g від проміжку часу вогневого впливу t . У роботі [15] показано, що різниця $\delta_{A,HC}$ між площами під залежностями температури газового середовища $\theta_g(t)$, отриманими для температурного режиму вуглеводневої пожежі й для стандартного температурного режиму, із підвищенням проміжку часу вогневого впливу від 30 хв до 240 хв зменшується від 44,3% до 8,4%. Для температурного режиму зовнішньої пожежі така різниця $\delta_{A,ef}$ збільшується (за модулем) від -9,3% (для $t = 30$ хв) до -32,9% (для $t = 240$ хв);

– 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 поперечного перерізу A_p/V і зі

зменшенням критичної температури сталі θ_{cr} зменшується. З підвищенням проміжку часу t_{fr} для температурного режиму вуглеводневої пожежі вплив A_p/V і θ_{cr} на різницю $\delta_{d,HC}$ зменшується. Для цього ж режиму пожежі вплив коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу λ_p на різницю $\delta_{t,HC}$ спостерігається тільки для проміжку часу $t_{fr} = 240$ хв, за якого підвищення λ_p призводить до незначного збільшення $\delta_{t,HC}$. Для температурного режиму зовнішньої пожежі з підвищенням λ_p різниця $\delta_{d,ef}$ зменшується, а з підвищенням проміжку часу t_{fr} цей вплив збільшується.

Такі висновки можуть вважатися за доцільні з практичного погляду, тому що дають змогу обґрунтовано підходити до оцінювання проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій для умов вогневого впливу за іншими номінальними температурними режимами пожежі, ніж стандартний. Для сталевих конструкцій з товщиною вогнезахисту, яка відповідає мінімальній товщині, необхідній за збереженості їхньої вогнестійкості впродовж певного проміжку часу вогневого впливу, визначений за стандартного температурного режиму, вони дають змогу спрогнозувати величину зменшення цього проміжку часу для вуглеводневої пожежі і його збільшення для зовнішньої пожежі.

З погляду теорії вони дають змогу стверджувати про визначеність впливу номінальних температурних режимів пожежі на проміжок часу збереженості вогнестійкості таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, що є певними перевагами проведеного дослідження. Однак варто зауважити, що результати дослідження отримано для вогнезахисного матеріалу, що має сталі, незалежні від температури значення коефіцієнта теплопровідності, а також певну величину питомої теплоємності $c_p = 1000$ Дж/(кг·°C) і густини $\rho_p = 500$ кг/м³. Насправді, значення коефіцієнта теплопровідності пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів залежать від низки параметрів,

зокрема від температури, а їх густина змінюється в широкому діапазоні [18–19]. Крім того, результати дослідження отримано тільки для одношарової системи вогнезахисту. Зазначене може призвести до наявності відмінностей в отриманих результатах стосовно проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій для умов вогневого впливу за іншими номінальними температурними режимами, ніж стандартний.

Така невизначеність накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися як недоліки зазначеного дослідження. Неможливість зняти вказані обмеження в межах цього дослідження породжує потенційно цікавий напрям подальших досліджень. Вони, зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій, оснащених одно- і багатшаровими системами вогнезахисту, в яких застосовують вогнезахисні матеріали зі змінним коефіцієнтом теплопровідності і різною густиною. Таке виявлення дасть змогу оцінити оптимальні параметри різних систем вогнезахисту для сталевих конструкцій, прийнятні для забезпечення їхньої вогнестійкості в широкому діапазоні проміжку часу вогневого впливу за різними номінальними температурними режимами.

Висновки та напрями подальших досліджень. Проведеним дослідженням для умов вогневого впливу за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі визначено дані щодо проміжку часу збереженості вогнестійкості таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту за такими параметрами цих конструкцій, за якими в роботі [15] оцінено необхідну мінімальну товщину вогнезахисту цієї системи за стандартного температурного режиму, і дані щодо різниці у значеннях такого проміжку часу, отриманих для цих номінальних температурних режимів

пожежі.

Встановлено, що для діапазону параметрів сталевих конструкцій, що оцінено, проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі змінюється в діапазоні від 12,5 хв до 219,0 хв, який є вужчим, ніж діапазон для стандартного температурного режиму, що становить від 30 хв до 240 хв. Для температурного режиму зовнішньої пожежі цей діапазон складає від 33,3 хв до 500,1 хв, і він ширший, ніж для стандартного температурного режиму.

Визначено, що різниця $\delta_{t,HC}$ між значенням проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій $t_{fr,HC}$, отриманим для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, і значенням такого ж проміжку часу t_{fr} за стандартного температурного режиму змінюється в діапазоні від $-8,8\%$ до $-58,3\%$, а така ж різниця $\delta_{t,ef}$ для температурного режиму зовнішньої пожежі – в діапазоні від $11,0\%$ до $108,4\%$.

З'ясовано, що на величину цієї різниці як для умов вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, так і для умов вогневого впливу за температурного режиму зовнішньої пожежі, значно впливає значення проміжку часу збереженості вогнестійкості t_{fr} за стандартного температурного режиму, щодо якого цю різницю визначають. Закономірним є те, що з підвищенням проміжку часу t_{fr} для температурного режиму вуглеводневої пожежі різниця $\delta_{t,HC}$ зменшується (за модулем), а для температурного режиму зовнішньої пожежі різниця $\delta_{t,ef}$ збільшується. Для цих номінальних температурних режимів з підвищенням коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V і зі зменшенням критичної температури сталі θ_{cr} різниця зменшується. З підвищенням проміжку часу t_{fr} для температурного режиму вуглеводневої пожежі вплив A_p/V і θ_{cr} на різницю $\delta_{d,HC}$ зменшується. Для цього ж режиму пожежі вплив коефіцієнта теплопровідності застосовного вогнезахисного матеріалу λ_p

на різницю $\delta_{t,HC}$ спостерігається тільки для проміжку часу $t_{fr} = 240$ хв, за якого підвищення λ_p призводить до незначного збільшення $\delta_{t,HC}$. Для температурного режиму зовнішньої пожежі з підвищенням λ_p різниця $\delta_{d,ef}$ зменшується, а з підвищенням проміжку часу t_{fr} цей вплив збільшується.

Визначено напрями подальших

досліджень, які орієнтовані на виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на проміжок часу збереженості вогнестійкості для сталевих конструкцій з одно- і багат шаровими системами вогнезахисту, в яких застосовують вогнезахисні матеріали зі змінним коефіцієнтом теплопровідності та різною густиною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В 1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Київ : Міністерство України, 2017. 35 с.
2. EN 1363-1:2020. Fire resistance tests – Part 1 : General Requirements. European committee for standardization. Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 54 p.
3. 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.
4. 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.
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 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.
7. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. [Чинний від 2017-04-01]. Київ : Міністерство України, 2016. 111 с.
8. EN 1363-2:1999. Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures. European committee for standardization. Central Secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN. 16 p.
9. Новак С., Добрянський 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.
10. EN 1365-3:1999. Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 3 : Beams. European committee for standardization. Central Secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN. 14 p.
11. EN 1365-4:1999. Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 4 : Columns. European committee for standardization. Central Secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN. 11 p.
12. Калафат К., Вахитова Л. Аналитический обзор средств огнезащиты стальных конструкций 2019–2020 : публикация. Украинский центр стального производства. 2020. 200 с.
13. Калафат К., Вахитова Л. Аналитический обзор средств огнезащиты стальных конструкций 2021–2022. Украинский центр стального производства, 2022. 230 с.
14. Новак С., Круковський П., Перепелиця М. Визначення розподілу температури у сталевих конструкціях в умовах вогневого впливу розрахунковими методами. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2016. № 1(1). С. 9–15.
15. Новак С., Дрідж В., Добрянський 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.
16. Голованов В., Крючков Г. Оценка огнестойкости стальных конструкций при нормируемых температурных режимах пожара. *Пожары и чрезвычайные ситуации : предотвращение и ликвидация*. 2021. № 3. С. 52–60.
17. 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.
18. 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.
19. 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:10.1016/j.firesaf.2021.103361.

REFERENCES

1. Pozhezhna bezpeka ob'ektiv budivnytstva. Zahalni vymohy [Fire safety of construction sites. general requirements]. (2017). DBN V 1.1-7:2016 from 1 June 2017. Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
2. Fire resistance tests – Part 1: General Requirements. EN 1363-1:2020. European committee for standardization. Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN [in English].
3. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 4: Applied passive protection to steel members. EN 13381-4:2013. European committee for standardization. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN [in English].

4. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 8: Applied reactive protection to steel members. EN 13381-8:2013. European committee for standardization. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN [in English].
5. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. EN 1991-1-2:2002/AC:2013. European committee for standardization. Central secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN [in English].
6. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. EN 1993-1-2:2005. European committee for standardization. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN [in English].
7. Proektuvannia stalevykh konstrukttsii. Rozrakhunok konstrukttsii na vohnestiiikist [Design of steel structures. Calculation of structures for fire resistance.]. (2016). DSTU-N B V.2.6-211:2016 from 1 April 2017. Kyiv: Minrehion Ukrainy [in Ukrainian].
8. Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures. EN 1363-2:1999. European committee for standardization. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN [in English].
9. Novak, S., Dobrostan, O., Pustovyi, M. (2022). Vplyv temperaturnoho rezhymu pozhazhi na neobkhdnu minimalnu tovshchynu vohnezakhysnykh pokryttiv dlia stalevykh konstrukttsii. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhazhna bezpeka*, 2(14), 5–20. [in Ukrainian].
10. Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 3: Beams. EN 1365-3:1999. European committee for standardization. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN [in English].
11. Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 4: Columns. EN 1365-4:1999. European committee for standardization. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999 CEN [in English].
12. Kalafat, K., Vakhitova, L. (2020). Analiticheskij obzor sredstv ognезashchity stal'ny'kh konstrukcij 2019–2020 [Analytical review of means of fire protection of steel structures 2019–2020]. *Ukrainskij cenztr stal'nogo proizvodstva* [in Russian].
13. Kalafat K., Vakhitova, L. (2022). Analiticheskij obzor sredstv ognезashchity stal'ny'kh konstrukcij 2021–2022 [Analytical review of the means of fire protection of steel structures 2021–2022.]. *Ukrainskij cenztr stal'nogo proizvodstva* [in Russian].
14. Novak, S., Krukovskij, P., Perepelytsia, M. (2016). Vyznachennia rozpodilu temperatury u stalevykh konstrukttsiakh v umovakh vohnevoho vplyvu rozrakhunkovymy metodamy [Determination of temperature distribution in steel structures under fire conditions by calculation methods.]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhazhna bezpeka*, 1 (1), 9–15. [in Ukrainian].
15. Novak, S., Dridzh, V., Dobrostan, O., Novak, M. (2022). Vplyv teplofizychnykh vlastyvostei vohnezakhysnykh materialiv na teplovyy 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 pozhazhna bezpeka*, 1(13), 88–110. [in Ukrainian].
16. Golovanov, V., Kryuchkov, G. (2021). Otsenka ognestoikosti stalnykh konstrukttsii pri normiruemykh temperaturnykh rezhimakh pozhara [Evaluation of fire resistance of steel structures under normalized temperature conditions of fire]. *Pozhari i chrezvichainie situatsii: predotvrashchenie i likvidatsiya*, 3, 52–60. [in Russian].
17. Kovalov, A., Zobenko, N. (2016). Metodyka poperednoi otsinky vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttiv dlia stalevykh konstrukttsii v umovakh temperaturnoho rezhymu vuhlevodnoyi pozhazhi [Methodology for the forward assessment of the fireproof building of coatings for steel structures in the minds of the temperature regime in carbohydrate fire]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhazhna bezpeka*, 1(1), 59–65. [in Ukrainian].
18. Krukovskij, P., Novak, S., Poklonskij, V., Eremenko, S., Frolov, G. (2021). Otsenka ognestojkosti metallicheskich stroitel'ny'kh konstrukcij i ognезashhitnoj sposobnosti pokry'tij (raschetno-e'ksperimental'ny'j podkhod) [Evaluation of the fire resistance of metal building structures and the fire retardant ability of coatings (computational and experimental approach)]. Kiev: Izdatel'stvo TOV «Franko Pak» [in Russian].
19. 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:10.1016/j.firesaf.2021.103361 [in English].

THE INFLUENCE OF THE TEMPERATURE-TIME CURVE ON THE TIME PERIOD OF PRESERVATION OF FIRE RESISTANCE OF STEEL STRUCTURES

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 Protection of Ukraine, Ukraine*

KEYWORDS ANNOTATION

fire protection,
thermal
conductivity,
critical
temperature of
steel,
temperature-
time curve,
time period of
preservation of
fire resistance,
steel
structures,
thermophysical
properties

This study is devoted to the evaluation of the relationship between the values of the time period of preservation of fire resistance of protected steel structures, obtained for the conditions of fire exposure according to the temperature-time curve of hydrocarbon and external fire, and the values of this time interval for the standard temperature-time curve. It aimed to identify the effect of nominal temperature-time curves on the time period of preservation of fire resistance of such steel structures as beams and columns with a single-layer fire protection system, for a wide range of parameters of these structures. The calculation method, which is based on the solution of the direct one-dimensional problem of thermal conductivity, determined the data on the time period of preservation of fire resistance of such steel structures for the temperature-time curve of hydrocarbon and external fires and the data on the difference between these obtained values and the values of the same time period for the standard temperature-time curve. It was established that for the range of parameters of the steel structure that was evaluated, the time period of preservation of the fire resistance of the steel structure for the conditions of fire exposure under the temperature-time curve of a hydrocarbon fire varies in the range from 12.5 min to 219.0 min, which is narrower than the range for the standard temperature-time curve, which is from 30 min to 240 min. For the external fire temperature-time curve, this range is from 33.3 min to 500.1 min and is wider than for the standard temperature-time curve. It was determined that the difference between the values of the time period of preservation of fire resistance of a steel structure, obtained for the conditions of fire exposure under the temperature-time curve of a hydrocarbon fire, and the values of the same period of time under the standard temperature-time curve, varies in the range from -8.8% to -58.3%, and the same difference for the temperature-time curve of an external fire varies in the range from 11.0 % to 108.4 %. It was found that the value of this difference is significantly influenced by the value of the time period of preservation of fire resistance under the standard temperature-time curve, relative to which this difference is determined. It is natural that as this time period increases, this difference for the temperature-time curve of a hydrocarbon fire decreases (by modulus), and for the temperature-time curve of an external fire it increases. The influence of the coefficient of thermal conductivity of the applicable fire protection material, the coefficient of the cross-section and the critical temperature of the steel on the value of this difference was also established.