

УДК 614.841.45

ВПЛИВ ВІДХИЛУ ТЕМПЕРАТУРИ В ПЕЧІ ВІД НОМІНАЛЬНОГО РЕЖИМУ НА РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАННЯ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.88-104>

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

Новак М. С.², ORCID iD 0000-0002-5888-5812

Пустовий М. М.³, ORCID iD 0000-0003-1434-4296

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

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

²Національний університет харчових технологій, Україна

³Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

29.09.2023

Пройшла рецензування:

19.10.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

граничний стан за вогнестійкістю, відхил температури, критична температура, температурний режим, проміжок часу вогневого впливу, сталева конструкція, теплофізичні властивості.

АНОТАЦІЯ

Дослідження присвячене оцінюванню проміжку часу до настання граничного стану сталевих конструкцій за ознакою втрати несучої здатності з урахуванням наявності відхилу фактичної температури в печі від номінального режиму під час їхнього випробування на вогнестійкість за національними і європейськими стандартами. За мету ставилось виявлення залежності між цим проміжком часу для таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, і відхилом фактичної температури в печі від номінального режиму, а також визначення процедури коригування отриманих показників щодо цього проміжку часу для усунення впливу такого відхилу температури на результати випробування. Із застосуванням метода обчислювального експерименту, який ґрунтується на розв'язуванні прямої одномірної задачі теплопровідності, визначено дані щодо різниці між значеннями цього проміжку часу, отриманими за мінімально та максимально допустимих температур в печі, і значенням цього проміжку часу для номінального температурного режиму. Виявлено закономірності щодо впливу відхилу фактичної температури в печі від номінального режиму на результати випробування сталевих конструкцій в умовах стандартного температурного режиму за EN 1363-1:2020 і ДСТУ Б В.1.1-4-98*. Встановлено, що різниця між значеннями проміжку часу до досягнення на металевій поверхні сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту критичної температури 500 °С, отриманими за фактичним і номінальним температурними режимами в печі, залежить від проміжку часу вогневого впливу і показника відхилу між цими режимами, і не залежить від теплофізичних властивостей вогнезахисного покриття. Найбільші величини цієї різниці є різними для допустимих відхилів, регламентованих у національному і європейському стандартах. Для умов національного стандарту з підвищенням проміжку часу вогневого впливу від 30 хв до 240 хв величина цієї різниці зменшується від 14,7% до 3,3%, а для європейського стандарту – від 6,6% до 2,4%. Визначено процедуру коригування отриманих під час випробування показників щодо проміжку часу до настання граничного стану сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту за ознакою втрати несучої здатності, яка дає змогу усунути вплив відхилу фактичного температурного режиму в печі від номінального на результати випробування.

Постановка проблеми. Для оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій застосовують методи випробування, які наведено в європейських і національних стандартах, зокрема в EN 1365-3 [1] і ДСТУ Б В.1.1-13 [2] – для балок, в EN 1365-4 [3] і ДСТУ Б В.1.1-14 [4] – для колон. Під час цих випробувань визначають проміжки часу від початку вогневого впливу (від початку випробування) за стандартного температурного режиму до настання граничного стану зазначених будівельних конструкцій за ознакою втрати несучої здатності. Номінальну залежність температури в печі від проміжку часу вогневого впливу для цього режиму регламентовано в EN 1363-1 [5] і ДСТУ Б В.1.1-4 [6]. Враховуючи те, що практично неможливо в печі забезпечити температурний режим, який точно відтворює номінальну залежність, в цих же стандартах наведено допустимі відхилення від неї.

Наявність відхилення фактичної температури в печі від номінального режиму може зумовити похибки в результатах випробування сталевих конструкцій на вогнестійкість. Отже, показники щодо проміжку часу до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності, отримані за фактичного температурного режиму в печі, можливо слід коригувати (приводити до номінального температурного режиму) для їхнього подальшого врахування під час оцінювання вогнестійкості зазначених конструкцій. Однак є невизначеність стосовно значень таких похибок і процедури цього коригування.

З огляду на доцільність підвищення точності оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій актуальним слід вважати дослідження, спрямоване на подальше удосконалення і розвиток методів їх випробування на вогнестійкість за допомогою розроблення та впровадження процедури коригування отриманих результатів визначення проміжку часу до настання граничного стану (приведення їх до номінального

температурного режиму).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Температура димових газів у печі й тепловий потік на поверхні виробу є основними параметрами, що визначають граничні умови щодо впливу теплового середовища на зразки будівельних конструкцій, які піддають випробуванням на вогнестійкість [7]. Геометрія і форма печей, призначених для випробувань на вогнестійкість, впливають на ці граничні умови, однак вони не визначені у жодному нормативному документі [8].

Печі повинні бути гармонізовані таким чином, щоб мінімізувати різницю в їхніх теплових характеристиках, які впливають на зазначені умови [9]. На думку авторів [9], економічним варіантом такої гармонізації є збереження наявних печей і заміна засобів вимірювання температури димових газів, що використовують для керування піччю, зі звичайних стрижневих термопар на пластинчасті термометри, щоб враховувати більш реалістичне співвідношення конвекційної та радіаційної складових теплового потоку на поверхні виробу. За результатами дев'яти випробувань, проведених на двох газових печах і одній печі на рідкому пальному, встановлено, що керування температурного режиму за допомогою пластинчастих термометрів помітно зменшило різницю між розподілами температури на калібрувальній пластині порівняно з випадком застосування стрижневих термопар [9]. Також у цій роботі показано, що середня температура 4 пластинчастих термометрів завжди нижча за середню температуру 5 стрижневих термопар із незахищеним вимірювальним спаєм і пояснюється, що ця різниця пов'язана з більшою тепловою інерційністю (постійною часу) пластинчастих термометрів.

Через дослідження теплової інерційності стрижневих термопар встановлено, що похибки, пов'язані з вимірюванням температури в печі за їх застосування, є значними в перші 20 хв випробування [10]. Завдяки розвідці,

проведеній для порівняння різних засобів вимірювання температури в печі, з'ясовано, що для проміжку часу вогневого впливу до 8 хв різниця між показами температури у горизонтальній або вертикальній печі, визначеними екранованими стрижневими термopарами та пластинчастими термометрами, є значною, і це може вплинути на результати випробувань малої тривалості [11]. У роботі [12] показано, для тривалості до 10 хв різниця між показами температури у печі, визначеними екранованими стрижневими термopарами, пластинчастими термометрами, спрямованими полумєневими термометрами і стрижневими термopарами з незахищеним вимірювальним spaєм, є значною незалежно від типу засобу вимірювання, який використовують для керування пiччю. Однак після 10 хв ця різниця стає незначною, за винятком термopар із незахищеним вимірювальним spaєм, для яких покази температури трохи більші, ніж для інших трьох типів засобів вимірювання.

У роботі [13] показано, що під час випробування таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожеж, проміжок часу до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності суттєво відрізняється від проміжку, отриманого за стандартного режиму, і ця різниця може досягати 108%.

Незважаючи на практичну значущість результатів наведених вище досліджень, достатньою мірою не розглянуто вплив відхилення фактичного температурного режиму в печі від номінального на проміжок часу до настання граничного стану сталевих конструкцій за вогнестійкістю. В міжнародних, регіональних і національних стандартах регламентовано номінальні залежності температури в печі від проміжку часу вогневого впливу і допустимі відхилення, зокрема для стандартного режиму їх наведено в ISO 834-1 [14], EN 1363-1 [5] і

ДСТУ Б В.1.1-4 [6], але не вказано даних щодо можливого впливу цих відхилень на проміжок часу до настання граничного стану конструкцій за вогнестійкістю. Отже, є підстави вважати, що недостатня визначеність цього впливу, який стосується відхилення фактичного температурного режиму в печі від номінального, зумовлює необхідність проведення дослідження у цьому напрямі.

Формулювання цілей дослідження. За мету дослідження ставилось виявлення залежності між проміжком часу до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту (далі – сталеві конструкції), і відхиленням фактичної температури в печі від номінального режиму, а також визначення процедури коригування отриманих показників щодо цього проміжку часу для усунення впливу зазначеного відхилення температури на результати випробування.

Для досягнення зазначеного поставлено такі завдання:

- для умов вогневого впливу за стандартного температурного режиму і широкого діапазону теплофізичних властивостей вогнезахисного покриття (його коефіцієнта теплопровідності та питомої об'ємної теплоємності) визначити дані щодо різниці між значеннями проміжку часу до настання граничного стану сталеві конструкції за ознакою втрати несучої здатності, отриманими за мінімально і максимально допустимих температур у печі T_{min} і T_{max} , і значенням цього проміжку часу, визначеним за номінального температурного режиму T_s [5–6];

- виявити залежності різниці між проміжками часу до настання граничного стану сталеві конструкції за ознакою втрати несучої здатності, отриманими за фактичним і номінальним температурними режимами в печі, від параметрів сталеві конструкції (теплофізичних властивостей вогнезахисного покриття, проміжку часу до настання граничного стану) і відхилення

фактичного температурного режиму в печі від номінального;

– визначити процедуру коригування отриманих показників щодо проміжку часу до настання граничного стану сталевій конструкції за ознакою втрати несучої здатності для усунення впливу відхилення фактичного температурного режиму в печі від номінального на результати випробування на вогнестійкість.

Методи дослідження. Застосовано метод дослідження, складовими якого є обчислювальна процедура чисельного моделювання теплового стану сталевій конструкції, оснащеної вогнезахисним покриттям із заданими теплофізичними властивостями, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму (процедура розв’язання прямої задачі теплопровідності), процедури аналізу, порівняння, узагальнення, апроксимації та систематизації отриманих розрахункових даних із використанням лінійного числового регресійного аналізу. За критерій настання граничного стану сталевій конструкції за ознакою втрати несучої здатності брали досягнення критичної температури сталевій конструкції (далі – критичної температури), яка дорівнює 500 °C [6; 15–16]. Обчислювальні експерименти виконували за допомогою розв’язання прямої задачі теплопровідності для сталевій конструкції, яка має коефіцієнт поперечного перерізу 200 м⁻¹ (товщину 5 мм). Для розрахунку теплового стану сталевій конструкції в умовах вогневого впливу (температури сталі для різних проміжків часу вогневого впливу) використано одномірну двошарову математичну модель теплопровідності, яка складається із системи рівнянь, наведеної в [17]. Значення коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією і теплового випромінювання на обігрівній поверхні вогнезахисного покриття, теплофізичні властивості сталі та інші параметри цієї моделі вибрані

такими, як наведено в [15–16]. Розв’язання математичної моделі й прямої задачі теплопровідності з визначення температури сталі виконано методом кінцевих різниць за неявною схемою апроксимації [18].

Виклад основного матеріалу. За формулою (1) розраховували значення мінімально і максимально допустимих температур у печі (T_{min} і T_{max} , табл. 1) для стандартного температурного режиму, визначеного в ДСТУ Б В.1.1-4 [6]. Під час цих розрахунків враховували положення цього національного стандарту про те, що відхил d середньої температури в печі (далі – температури в печі) від її номінального значення T_s , залежно від проміжку часу t (хв) від початку вогневого впливу (від початку випробування) не повинен перевищувати таких значень:

- а) $\pm 15 \%$ для $5 < t \leq 10$;
- б) $\pm 15 - 0,5(t - 10) \%$ для $10 < t \leq 30$;
- в) $\pm 5 - 0,083(t - 30) \%$ для $30 < t \leq 60$;
- г) $\pm 2,5 \%$ для $t > 60$.

$$T_{min(max)} = T_s(1 + d_{lim}/100), \quad (1)$$

де $T_{min(max)}$ – значення мінімально або максимально допустимої температури в печі (T_{min} або T_{max}) для проміжку часу вогневого впливу t , °C;

T_s – номінальне значення температури в печі для проміжку часу вогневого впливу t , °C;

d_{lim} – допустимий відхил температури в печі від її номінального значення T_s , який залежить від проміжку часу вогневого впливу t і становить від $-2,5\%$ до $-15,0\%$ для мінімально допустимого режиму (d_{min} , табл. 1) і від $2,5\%$ до $15,0\%$ для максимально допустимого режиму (d_{max} , табл. 1). Для проміжку часу вогневого впливу від 0 до 5 хв під час розрахунків значення відхилення d_{lim} брали такі ж, як і для інтервалу $5 < t \leq 10$.

Таблиця 1 – Значення температури в печі для мінімально і максимально допустимих температурних режимів у печі за національним і європейським стандартами

t , хв	T_s , °C	Дані за ДСТУ Б В.1.1-4 [6]						Дані за EN 1363-1 [5]			
		T_{min} , °C	d_{min} , %	$d_{e,min}$, %	T_{max} , °C	d_{max} , %	$d_{e,max}$, %	$T_{min,e}$, °C	$d_{e,min,e}$, %	$T_{max,e}$, °C	$d_{e,max,e}$, %
0	20	20	0	0	20	0	0	20	0	20	0
2	444	378	-15	-14,88	511	15	14,88	375	-15	514	15
4	544	462	-15	-14,95	625	15	14,95	459	-15	628	15
6	603	512	-15	-14,97	693	15	14,97	510	-15	697	15
8	645	548	-15	-14,98	742	15	14,98	546	-15	745	15
10	678	576	-15	-14,99	780	15	14,99	583	-15	765	15
15	738	646	-12,5	-14,47	830	12,5	14,47	691	-12,5	786	12,5
20	781	703	-10	-13,49	859	10	13,49	767	-10	796	10
25	814	753	-7,5	-12,35	875	7,5	12,35	837	-7,5	792	7,5
30	841	799	-5	-11,13	883	5	11,13	860	-5	824	5
35	864	825	-4,59	-10,05	904	4,59	10,05	846	-4,59	884	4,59
40	884	847	-4,17	-9,21	921	4,17	9,21	872	-4,17	897	4,17
50	918	887	-3,34	-7,93	948	3,34	7,93	919	-3,34	917	3,34
60	945	921	-2,5	-6,95	969	2,5	6,95	946	-2,5	945	2,5
80	988	963	-2,5	-5,67	1013	2,5	5,67	964	-2,5	1013	2,5
100	1021	996	-2,5	-4,94	1047	2,5	4,94	996	-2,5	1047	2,5
120	1049	1022	-2,5	-4,47	1075	2,5	4,47	1023	-2,5	1075	2,5
140	1072	1045	-2,5	-4,15	1099	2,5	4,15	1045	-2,5	1099	2,5
160	1092	1064	-2,5	-3,91	1119	2,5	3,91	1065	-2,5	1119	2,5
180	1109	1082	-2,5	-3,73	1137	2,5	3,73	1082	-2,5	1137	2,5
200	1125	1097	-2,5	-3,59	1153	2,5	3,59	1097	-2,5	1154	2,5
220	1139	1111	-2,5	-3,48	1168	2,5	3,48	1111	-2,5	1168	2,5
240	1152	1124	-2,5	-3,38	1181	2,5	3,38	1124	-2,5	1182	2,5

За номінального значення температури в печі T_s за процедурою [18] через розв'язання прямої задачі теплопровідності визначали мінімальну товщину вогнезахисного покриття $d_{p,min}$, за якої для певного номінального проміжку часу вогневого впливу t_{fr} розрахункова температура (далі – температура сталі) на металевій поверхні сталеві конструкції (під шаром вогнезахисного покриття) з коефіцієнтом поперечного перерізу 200 м^{-1} дорівнює критичній температурі, яка становить $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Ці розрахунки виконували за таких значень коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності вогнезахисного покриття: $\lambda_{p,min} = 0,02 \text{ Вт/(м} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$; $\lambda_{p,med} = 0,2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$; $\lambda_{p,max} = 2,0 \text{ Вт/(м} \cdot \text{}^\circ\text{C)}$; $(c_p \rho_p)_{min} = 0,1 \text{ МДж/(м}^3 \cdot \text{}^\circ\text{C)}$; $(c_p \rho_p)_{med} = 0,5 \text{ МДж/(м}^3 \cdot \text{}^\circ\text{C)}$; $(c_p \rho_p)_{max} = 1,0 \text{ МДж/(м}^3 \cdot \text{}^\circ\text{C)}$, і номінального проміжку часу вогневого впливу: $t_{fr,min} = 30 \text{ хв}$; $t_{fr,med} = 90 \text{ хв}$; $t_{fr,max} = 240 \text{ хв}$. Результати цих розрахунків наведено в табл. 2.

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

$c_p \rho_p$, МДж/ ($\text{м}^3 \cdot \text{}^\circ\text{C}$)	λ_p , Вт/($\text{м} \cdot \text{}^\circ\text{C}$)	Необхідна мінімальна товщина вогнезахисного покриття $d_{p,min}$ (у мм) для:		
		$t_{fr,min}$	$t_{fr,med}$	$t_{fr,max}$
0,1	0,02	1,33	5,86	19,0
0,5	0,02	1,31	5,53	16,2
1,0	0,02	1,28	5,20	14,2
0,1	0,2	12,8	52,0	142
0,5	0,2	11,4	38,7	88,5
1,0	0,2	10,1	31,6	68,3
0,1	2,0	101	316	683
0,5	2,0	63,5	172	343
1,0	2,0	47,5	126	249

Із аналізу даних, наведених у табл. 2, випливає, що для застосованого під час розрахунків діапазону параметрів сталеві конструкції (λ_p , $c_p \rho_p$, t_{fr}) величина необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття $d_{p,min}$ змінюється від 1,28 мм до 683 мм і суттєво залежить від значень коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття λ_p та проміжку часу t_{fr} . Вплив питомої об'ємної

теплоємності вогнезахисного покриття $c_p\rho_p$ на величину товщини $d_{p,min}$ є значним для максимального значення коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,max} = 2,0$ Вт/(м·°C), а для менших значень цього коефіцієнта він зменшується. Є закономірність щодо співвідношення значень товщини $d_{p,min}$, визначених для $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,min} = 0,02$ Вт/(м·°C) і $(c_p\rho_p)_{min} = 0,1$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°C), а також $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°C) і $(c_p\rho_p)_{min} = 0,1$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,max} = 2,0$ Вт/(м·°C). Величина цього співвідношення для всіх значень проміжку часу t_{fr} складає 0,1. Наприклад, для $t_{fr,min} = 30$ хв і $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,min} = 0,02$ Вт/(м·°C) товщина $d_{p,min}$ дорівнює 1,28 мм, для $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°C) ця товщина – 12,8 мм, а їхнє співвідношення становить 0,1. Слід зазначити, що вказане співвідношення значень товщини $d_{p,min}$ дорівнює співвідношенню значень питомої об'ємної теплоємності вогнезахисного покриття $(c_p\rho_p)_{min} = 0,1$ МДж/(м³·°C) і $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°C). Водночас для співвідношення значень товщини $d_{p,min}$, визначених для $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,min} = 0,02$ Вт/(м·°C) і $(c_p\rho_p)_{min} = 0,1$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°C), добуток коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності вогнезахисного покриття $\lambda_p c_p \rho_p$ є однаковим: $\lambda_{p,min}(c_p\rho_p)_{max} = 0,02 \cdot 1,0 = 0,02$; $\lambda_{p,med}(c_p\rho_p)_{min} = 0,2 \cdot 0,1 = 0,02$. Для співвідношення значень товщини $d_{p,min}$, визначених для $(c_p\rho_p)_{max} = 1,0$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°C) і $(c_p\rho_p)_{min} = 0,1$ МДж/(м³·°C), $\lambda_{p,max} = 2,0$ Вт/(м·°C) цей добуток $\lambda_p c_p \rho_p$ теж є однаковим, хоча має іншу величину: $\lambda_{p,med}(c_p\rho_p)_{max} = 0,2 \cdot 1,0 = 0,2$; $\lambda_{p,max}(c_p\rho_p)_{min} = 2,0 \cdot 0,1 = 0,2$.

За мінімально і максимально допустимих температур у печі T_{min} і T_{max} , наведених у табл. 1, через розв'язання прямої задачі теплопровідності із

застосуванням отриманих даних щодо товщини $d_{p,min}$ (табл. 2) визначали проміжок часу вогневого впливу ($t_{fr,Tmin}$ або $t_{fr,Tmax}$), за якого температура сталі дорівнює 500 °C. Результати цих розрахунків наведено в табл. 3, 4, в яких $d_{p,min,30}$, $d_{p,min,90}$, $d_{p,min,240}$ – це значення товщини вогнезахисного покриття, які дорівнюють величинам його необхідної мінімальної товщини $d_{p,min}$ (див. табл. 2), отриманим відповідно для проміжків часу вогневого впливу $t_{fr,min} = 30$ хв, $t_{fr,med} = 90$ хв, $t_{fr,max} = 240$ хв за стандартного температурного режиму (за його номінальних значень T_s (табл. 1)).

Таблиця 3 – Результати розрахунку проміжку часу $t_{fr,Tmin}$

$c_p\rho_p$, МДж/ (м³·°C)	λ_p , Вт/(м·°C)	Проміжок часу $t_{fr,Tmin}$ (у хв) для:		
		$d_{p,min,30}$	$d_{p,min,90}$	$d_{p,min,240}$
0,1	0,02	34,4	95,2	248,6
0,5	0,02	34,4	95,1	248,1
1,0	0,02	34,3	95,1	248,1
0,1	0,2	34,3	95,1	248,1
0,5	0,2	34,4	95,1	247,9
1,0	0,2	34,3	95,1	248,0
0,1	2,0	34,3	95,5	248,1
0,5	2,0	34,6	95,4	247,9
1,0	2,0	34,7	95,3	248,8

Таблиця 4 – Результати розрахунку проміжку часу $t_{fr,Tmax}$

$c_p\rho_p$, МДж/ (м³·°C)	λ_p , Вт/(м·°C)	Проміжок часу $t_{fr,Tmax}$ (у хв) для:		
		$d_{p,min,30}$	$d_{p,min,90}$	$d_{p,min,240}$
0,1	0,02	26,0	85,1	231,1
0,5	0,02	26,0	85,1	231,2
1,0	0,02	25,9	85,1	231,8
0,1	0,2	25,9	85,1	232,2
0,5	0,2	26,0	85,2	232,3
1,0	0,2	25,8	85,1	232,8
0,1	2,0	25,8	85,1	232,7
0,5	2,0	25,8	85,1	232,2
1,0	2,0	25,7	84,7	232,9

Із аналізу даних, наведених у табл. 3, 4, випливає, що для застосованого під час розрахунків діапазону параметрів сталевій конструкції проміжок часу вогневого впливу ($t_{fr,Tmin}$ або $t_{fr,Tmax}$), за якого температура сталі дорівнює критичній температурі 500 °C, змінюється від 34,3 хв

до 248,8 хв і від 25,7 хв до 232,9 хв, відповідно за умов забезпечення мінімально і максимально допустимих температур в печі (T_{min} і T_{max}), наведених у табл. 1. Середні значення проміжків часу становлять: 34,41 хв; 95,21 хв; 248,18 хв – для $t_{fr,Tmin}$, і 25,88 хв; 85,07 хв; 232,13 хв – для $t_{fr,Tmax}$. Відносні стандартні відхили (відносні середньо квадратичні відхили) становлять: 0,42%; 0,16%; 0,13% – для $100S_{Tmin}/t_{fr,Tmin}$, і 0,42%; 0,17%; 0,28% – для $100S_{Tmax}/t_{fr,Tmax}$. Такі малі величини відхилів свідчать про несуттєвий вплив коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності вогнезахисного покриття на проміжки часу до досягнення критичної температури 500 °С.

У табл. 5, 6 наведено дані щодо різниці між значенням проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С ($t_{fr,Tmin}$ або $t_{fr,Tmax}$, табл. 3, 4), отриманим за умови, що температура в печі дорівнює мінімально допустимому значенню T_{min} або максимально допустимому значенню T_{max} (табл. 1), і значенням цього ж проміжку часу t_{fr} ($t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв) за номінального температурного режиму T_s (табл. 1). Цю різницю розраховували за такими формулами:

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

$$\delta_{t,Tmax} = 100(t_{fr,Tmax} - t_{fr})/t_{fr}, \quad (3)$$

де $\delta_{t,Tmin}$ – різниця між значенням проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С, отриманим за мінімально допустимої температури в печі T_{min} , і значенням цього ж проміжку часу за номінальної температури T_s , %;

$\delta_{t,Tmax}$ – різниця між значенням проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С, отриманим за максимально допустимої температури в печі T_{max} , і значенням цього ж проміжку часу за номінальної температури T_s , %;

$t_{fr,Tmin}$ і $t_{fr,Tmax}$ – значення проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С, отримані відповідно за мінімально і максимально допустимою температурою

в печі (T_{min} і T_{max}), які наведено в табл. 3, 4, хв;

t_{fr} – значення проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С за номінальної температури (T_s), $t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв.

Таблиця 5 – Результати розрахунку різниці $\delta_{t,Tmin}$

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°С)	λ_p , Вт/(м·°С)	Різниця $\delta_{t,Tmin}$ (у %) для:		
		$t_{fr,min}$	$t_{fr,med}$	$t_{fr,max}$
0,1	0,02	14,67	5,78	3,58
0,5	0,02	14,67	5,67	3,38
1,0	0,02	14,33	5,67	3,38
0,1	0,2	14,33	5,67	3,38
0,5	0,2	14,67	5,67	3,29
1,0	0,2	14,33	5,67	3,33
0,1	2,0	14,33	6,11	3,38
0,5	2,0	15,33	6,00	3,29
1,0	2,0	15,67	5,89	3,67

Таблиця 6 – Результати розрахунку різниці $\delta_{t,Tmax}$

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°С)	λ_p , Вт/(м·°С)	Різниця $\delta_{t,Tmax}$ (у %) для:		
		$t_{fr,min}$	$t_{fr,med}$	$t_{fr,max}$
0,1	0,02	-13,33	-5,44	-3,71
0,5	0,02	-13,33	-5,44	-3,67
1,0	0,02	-13,67	-5,44	-3,42
0,1	0,2	-13,67	-5,44	-3,25
0,5	0,2	-13,33	-5,33	-3,21
1,0	0,2	-14,00	-5,44	-3,00
0,1	2,0	-14,00	-5,44	-3,04
0,5	2,0	-14,00	-5,44	-3,25
1,0	2,0	-14,33	-5,89	-2,96

Із аналізу даних, наведених у табл. 5, 6, випливає, що для застосованого під час розрахунків діапазону параметрів сталевих конструкцій значення різниць $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$ змінюється від 3,29% до 15,67% і від -2,96% до -14,33% відповідно. Кореляції між цими різницями, коефіцієнтом теплопровідності λ_p і питомою об'ємною теплоємністю $c_p \rho_p$ вогнезахисного покриття не спостерігається. Існує їхня залежність від проміжку часу t_{fr} , яку наведено на рис. 1. Закономірним є зменшення (за модулем) різниць $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$ з підвищенням проміжку часу t_{fr} . Цю графічну залежність побудовано за даними щодо середніх

значень, які мають різниці $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$ для проміжків часу $t_{fr,min}$, $t_{fr,med}$, $t_{fr,max}$ (див. табл. 7). Стандартні відхилення (S_{Tmin} , S_{Tmax}) від середніх значень різниць $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$ становлять: 0,48%; 0,17%; 0,13% – для $t_{fr,min,Tmin}$; $t_{fr,med,Tmin}$; $t_{fr,max,Tmin}$, і 0,36%; 0,16%; 0,27% – для $t_{fr,min,Tmax}$; $t_{fr,med,Tmax}$; $t_{fr,max,Tmax}$. Такі малі величини відхилів свідчать про несуттєвий вплив коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності вогнезахисного покриття на різницю між значеннями проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С, отриманими за умовами наявності відхилів температури в печі від номінального режиму. Це обґрунтовує застосування надалі в розрахунках середніх значень різниць, зокрема $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$.

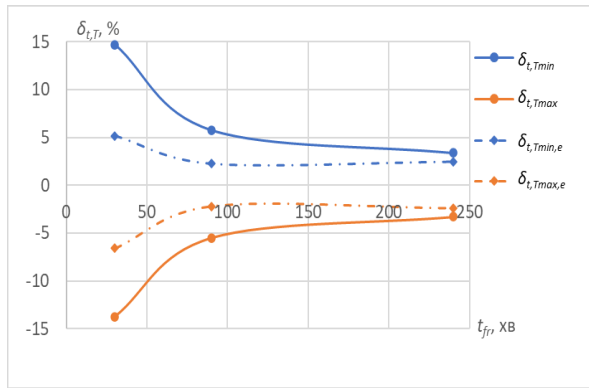


Рисунок 1 – Залежності різниць між значеннями проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С, отриманими за мінімально і максимально допустимими температурними режимами в печі, і цим проміжком часу за номінальної температури в печі від t_{fr}

Таблиця 7 – Результати розрахунку середніх значень різниць $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$

Проміжок часу t_{fr} , хв	Середнє значення різниці $\delta_{t,Tmin}$, %	Середнє значення різниці $\delta_{t,Tmax}$, %
30	14,70	-13,74
90	5,79	-5,48
240	3,41	-3,28

На рис. 2 наведено залежності різниці $\delta_{t,T}$ між значенням проміжку часу до досягнення критичної температури

500 °С, отриманим за певного фактичного температурного режиму в печі $T_i(t)$, який відрізняється від номінального $T_s(t)$, і значенням цього ж проміжку часу за номінального температурного режиму $T_s(t)$, від показника d_e , який визначає ступінь відхилення між цими режимами, для різних проміжків часу t_{fr} . Як показник, що визначає ступінь відхилення між фактичним і номінальним температурними режимами в печі, взято відносний відхил d_e (формула (4)) площі під кривою фактичної температури в печі $T_i(t)$ від площі під кривою номінального температурного режиму $T_s(t)$. Для побудови рис. 2 використано дані щодо різниці $\delta_{t,T}$, наведені в табл. 7 і дані про те, що за відсутності відхилення між фактичним і номінальним температурними режимами в печі різниця $\delta_{t,T}$ дорівнює нулю. Також застосовано дані про значення відхилення d_e для температурних режимів з мінімально і максимально допустимими температурами T_{min} і T_{max} , наведеними в табл. 1, яке становить для $t = 30$ хв: -11,13% і 11,13% для $T_{min}(t)$ і $T_{max}(t)$; для $t = 90$ хв: -5,26% і 5,26% для $T_{min}(t)$ і $T_{max}(t)$; для $t = 240$ хв: -3,38 % і 3,38 % для $T_{min}(t)$ і $T_{max}(t)$. Водночас визначення даних щодо площ A_i і A_s здійснювали за формулами (Г.1) і (Г.2) ДСТУ Б В.1.1-4 [6].

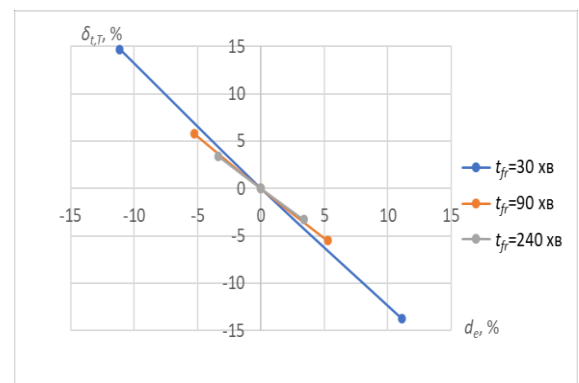


Рисунок 2 – Залежність різниці $\delta_{t,T}$ від відхилення d_e для різних проміжків часу t_{fr}

$$d_e = 100(A_i - A_s)/A_s, \quad (4)$$

де d_e – відхил площі під кривою фактичної температури в печі $T_i(t)$ від площі під кривою номінального температурного режиму $T_s(t)$, %;

A_i – площа під фактичною кривою температурного режиму в печі $T_i(t)$, °С·хв;

A_s – площа під кривою номінального температурного режиму $T_s(t)$, °С·хв.

Із аналізу рис. 2 випливає, що залежність різниці $\delta_{i,T}$ від відхилю d_e має лінійний характер, а вплив відхилю d_e на значення різниці δ_i є найбільший для проміжку часу $t_{fr} = 30$ хв і найменший для $t_{fr} = 240$ хв.

Для апроксимації отриманих розрахункових даних щодо різниці між значеннями проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С, отриманими за фактичним і номінальним температурними режимами в печі, здійснено лінійний числовий регресійний аналіз із застосуванням такого рівняння:

$$\delta_{i,T} = a_0 + a_1 d_e + a_2 d_e t_{fr,T} + a_3 t_{fr,T}, \quad (5)$$

де $\delta_{i,T}$ – різниця між значенням проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С ($t_{fr,T}$), отриманим за певного фактичного температурного режиму в печі $T_i(t)$, і

значенням цього ж проміжку часу (t_{fr}) за номінального температурного режиму $T_s(t)$, %;

d_e – відхил площі під кривою фактичної температури в печі $T_i(t)$ від площі під кривою номінального температурного режиму $T_s(t)$, %;

$t_{fr,T}$ – проміжок часу до досягнення критичної температури 500 °С, отриманий за фактичного температурного режиму в печі $T_i(t)$, хв;

a_0, a_1, a_2, a_3 – коефіцієнти регресії.

Розв'язуючи рівняння регресії (5) за даними щодо середніх значень різниць $\delta_{i,Tmin}$ і $\delta_{i,Tmax}$ (табл. 7) і проміжків часу $t_{fr,Tmin}$ і $t_{fr,Tmax}$ (табл. 3, 4), наведеними в табл. 8, із застосуванням програми для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel, визначено значення коефіцієнтів регресії, які вказано в табл. 9. В табл. 8 також наведено значення різниці $\delta_{i,T,cal}$, розраховані за рівнянням (5) із використанням отриманих коефіцієнтів регресії, і значення відносного відхилю $\Delta\delta_{i,T,cal}$ між різницями $\delta_{i,T,cal}$ та $\delta_{i,T}$, який визначали за такою формулою:

$$\Delta\delta_{i,T,cal} = 100(\delta_{i,T,cal} - \delta_{i,T})/\delta_{i,T}. \quad (6)$$

Таблиця 8 – Дані для розрахунку коефіцієнтів регресії

Різниця $\delta_{i,T}$, %	Відхил d_e , %	Проміжок часу $t_{fr,T}$, хв	Розрахункове значення різниці $\delta_{i,T,cal}$, %	Відносний відхил між різницями $\Delta\delta_{i,T,cal}$, %
0	0	30	0,91	–
0	0	90	0,65	–
0	0	240	–0,02	–
14,70	–10,16	34,41	13,59	–7,59
5,79	–5,09	95,21	6,53	12,8
3,41	–3,35	248,18	3,09	–9,40
–13,74	12,10	25,88	–14,34	4,37
–5,48	5,45	85,07	–5,74	4,73
–3,28	3,42	232,13	–3,27	–0,41

Таблиця 9 – Результати розрахунку коефіцієнтів регресії

a_0	a_1	a_2	a_3
1,042	–1,300	0,001460	–0,004405

Із аналізу табл. 8 випливає, що відносний відхил $\Delta\delta_{i,T,cal}$ змінюється від –9,40% до 12,8%, а його середнє значення

складає 0,75%, що свідчить про задовільну збіжність даних щодо різниці $\delta_{i,T,cal}$, розрахованих за рівнянням (5), з даними

$\delta_{t,T}$, отриманими із застосуванням методу обчислювального експерименту.

Взаємозв'язок між різницею $\delta_{t,T}$ і проміжками часу ($t_{fr,T}$ і t_{fr}), отриманими за фактичного та номінального температурними режимами в печі, визначається за такою формулою:

$$\delta_{t,T} = 100(t_{fr,T} - t_{fr})/t_{fr} . \quad (7)$$

За даними щодо температури сталі та фактичної температури в печі, отриманими під час випробування, можна визначити проміжок часу $t_{fr,T}$ до досягнення критичної температури 500 °С, відхил d_e (за формулою (4)) і різницю $\delta_{t,T}$ (за формулою (5)). Для визначення значення проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °С, яке б було за номінального температурного режиму в печі, необхідно провести коригування отриманого під час випробування проміжку часу $t_{fr,T}$. Коригований проміжок часу $t_{fr,c}$ визначають за формулою (8), яку отримано за допомогою алгебраїчного перетворення формули (7) і враховуючи те, що коригований проміжок часу $t_{fr,c}$ має бути максимально наближений до проміжку часу t_{fr} до досягнення критичної температури 500 °С за номінального температурного режиму.

$$t_{fr,c} = t_{fr,T}/(1 + \delta_{t,T}/100) . \quad (8)$$

За оцінювання точності розрахунків за цією формулою, із застосуванням даних щодо проміжку часу $t_{fr,Tmin}$ і $t_{fr,Tmax}$, наведених в табл. 3, 4 (як проміжку часу $t_{fr,T}$ в рівнянні (5) і формулі (8)), рівняння (5) і табл. 9 визначено дані щодо коригованого проміжку часу $t_{fr,c}$ для номінального температурного режиму і дані щодо різниці ($\delta_{t,c,Tmin}$ і $\delta_{t,c,Tmax}$) між коригованими і номінальними значеннями ($t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв) проміжків часу. Результати цих розрахунків наведено в табл. 10–13. У табл. 10, 11 $t_{fr,min,Tmin}$, $t_{fr,med,Tmin}$, $t_{fr,max,Tmin}$, $t_{fr,min,Tmax}$, $t_{fr,med,Tmax}$, $t_{fr,max,Tmax}$ – це значення проміжку часу, які відповідають $t_{fr,Tmin}$ і $t_{fr,Tmax}$, наведеним у табл. 3, 4.

Таблиця 10– Результати розрахунку коригованого проміжку часу $t_{fr,c}$, отримані за даними щодо проміжку часу $t_{fr,Tmin}$

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°С)	λ_p , Вт/(м·°С)	Коригований проміжок часу $t_{fr,c}$ (у хв) для:		
		$t_{fr,min,Tmin}$	$t_{fr,med,Tmin}$	$t_{fr,max,Tmin}$
0,1	0,02	30,29	89,36	241,16
0,5	0,02	30,29	89,27	240,66
1,0	0,02	30,20	89,27	240,66
0,1	0,2	30,20	89,27	240,66
0,5	0,2	30,29	89,27	240,46
1,0	0,2	30,20	89,27	240,56
0,1	2,0	30,20	89,65	240,66
0,5	2,0	30,46	89,55	240,46
1,0	2,0	30,55	89,46	241,36

Таблиця 11 – Результати розрахунку коригованого проміжку часу $t_{fr,c}$, отримані за даними щодо проміжку часу $t_{fr,Tmax}$

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°С)	λ_p , Вт/(м·°С)	Коригований проміжок часу $t_{fr,c}$ (у хв) для:		
		$t_{fr,min,Tmax}$	$t_{fr,med,Tmax}$	$t_{fr,max,Tmax}$
0,1	0,02	30,35	90,28	238,91
0,5	0,02	30,35	90,28	239,01
1,0	0,02	30,24	90,28	239,63
0,1	0,2	30,24	90,28	240,04
0,5	0,2	30,35	90,39	240,14
1,0	0,2	30,12	90,28	240,66
0,1	2,0	30,12	90,28	240,56
0,5	2,0	30,12	90,28	240,04
1,0	2,0	30,00	89,86	240,76

Таблиця 12 – Результати розрахунку різниці $\delta_{t,c,Tmin}$ між коригованими і номінальними значеннями проміжку часу

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°С)	λ_p , Вт/(м·°С)	Різниця $\delta_{t,c,Tmin}$ (у %) для:		
		$t_{fr,min}$	$t_{fr,med}$	$t_{fr,max}$
0,1	0,02	0,95	–0,71	0,48
0,5	0,02	0,95	–0,81	0,28
1,0	0,02	0,66	–0,81	0,28
0,1	0,2	0,66	–0,81	0,28
0,5	0,2	0,95	–0,81	0,19
1,0	0,2	0,66	–0,81	0,23
0,1	2,0	0,66	–0,39	0,28
0,5	2,0	1,54	–0,50	0,19
1,0	2,0	1,84	–0,60	0,57

Таблиця 13 – Результати розрахунку різниці $\delta_{t,c,Tmax}$ між коригованими і номінальними значеннями проміжку часу

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°C)	λ_p , Вт/(м·°C)	Різниця $\delta_{t,c,Tmax}$ (у %) для:		
		$t_{fr,min}$	$t_{fr,med}$	$t_{fr,max}$
0,1	0,02	1,17	0,31	-0,46
0,5	0,02	1,17	0,31	-0,41
1,0	0,02	0,79	0,31	-0,16
0,1	0,2	0,79	0,31	0,02
0,5	0,2	1,17	0,43	0,06
1,0	0,2	0,40	0,31	0,28
0,1	2,0	0,40	0,31	0,23
0,5	2,0	0,40	0,31	0,02
1,0	2,0	0,01	-0,16	0,32

Із аналізу даних, наведених у табл. 12, 13, випливає, що значення різниці між коригованими і номінальними значеннями проміжку часу змінюється: від -0,70% до 0,98% – для $t_{fr,Tmin}$ і від -0,01% до 0,70% – для $t_{fr,Tmax}$. Середні значення різниць $\delta_{t,c,Tmin}$ і $\delta_{t,c,Tmax}$ становлять 0,20% і 0,32% відповідно, а їхні стандартні відхили (S_{Tmin} , S_{Tmax}) – 0,75% і 0,42%, відповідно для $\delta_{t,c,Tmin}$ і $\delta_{t,c,Tmax}$. Зазначені розрахункові дані свідчать про те, що коригування проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °C, виконане із

застосуванням формули (8), призвело до суттєвого наближення результатів визначення проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °C, отриманих за фактичних мінімально і максимально допустимих температурних режимів в печі (T_{min} і T_{max}), до значень цього проміжку часу за номінального температурного режиму T_s .

На відміну від національного ДСТУ Б В.1.1-4 [6], європейський стандарт EN 1363-1 [5] регламентує не значення допустимого відхилю d_{lim} температури в печі від її номінального значення T_s і відповідні допустимі мінімальні та максимальні температури в печі (T_{min} і T_{max}), а встановлює допустимий відносний відхил $d_{e,lim,e}$ ($d_{e,min,e}$ і $d_{e,max,e}$) площі під кривою фактичної температури в печі $T_i(t)$ від площі під кривою номінального температурного режиму $T_s(t)$. Слід зауважити, що значення допустимого відхилю $d_{e,lim,e}$, також як і d_{lim} , залежить від проміжку часу t від початку вогневого впливу, і його визначають за такими ж залежностями, як і для d_{lim} .

Однак допустимі температури в печі (табл. 1, T_{min} і T_{max}), які розраховано за формулою (1) із застосуванням допустимого відхилю d_{lim} , відрізняються від значень (табл. 1, $T_{min,e}$ і $T_{max,e}$), які визначено за формулою (9) із застосуванням допустимого відхилю $d_{e,lim,e}$.

$$T_{i,min(max),e} = 2(A_{si}(1 + d_{e,lim,e}/100) - A_{i-1,min(max)})/(t_i - t_{i-1}) - T_{i-1,min(max),e}, \quad (9)$$

де $T_{i,min(max),e}$ – значення температури в печі за мінімально або максимально допустимого температурного режиму в печі ($T_{min,e}(t)$ або $T_{max,e}(t)$) для проміжку часу вогневого впливу t_i , °C;

$T_{i-1,min(max),e}$ – значення температури в печі за мінімально або максимально допустимого температурного режиму в печі ($T_{min,e}(t)$ або $T_{max,e}(t)$) для проміжку часу вогневого впливу t_{i-1} , °C;

A_{si} – площа під кривою номінального температурного режиму $T_s(t)$ для проміжку часу вогневого впливу t_i , °C·хв;

$A_{i-1,min(max)}$ – площа під кривою мінімально або максимально допустимого температурного режиму в печі ($T_{min,e}(t)$ або $T_{max,e}(t)$) для проміжку часу вогневого впливу t_{i-1} , °C·хв;

$d_{e,lim,e}$ – допустимий відхил площі під кривою мінімально або максимально допустимого температурного режиму в печі ($T_{min,e}(t)$ або $T_{max,e}(t)$) від площі під кривою номінального температурного режиму $T_s(t)$, %, який становить від -2,5% до -15,0% для мінімально допустимого режиму ($d_{e,min,e}$, табл. 1) і від 2,5% до 15,0% для максимально допустимого режиму ($d_{e,max,e}$, табл. 1);

t_i , t_{i-1} – проміжки часу вогневого впливу, хв.

На рис. 3 наведено залежності температури в печі ($T_{min,e}(t)$ та $T_{max,e}(t)$) для мінімально та максимально допустимих температурних режимів від проміжку часу вогневого впливу, які побудовано за даними, отриманими за формулою (9). Із аналізу цих даних випливає, що на відміну

від $T_{min}(t)$ та $T_{max}(t)$ не для всього проміжку часу вогневого впливу, що розглядається ($0 < t \leq 240$ хв), для мінімально допустимого температурного режиму значення температури $T_{min,e}$ менші за T_s , а для максимально допустимого температурного режиму значення температури $T_{max,e}$ більші за T_s . Для інтервалів проміжку часу від 22 хв до 30 хв і від 49 хв до 60 хв значення температури $T_{min,e}$ більші за T_s , а значення температури $T_{max,e}$ менші за T_s .

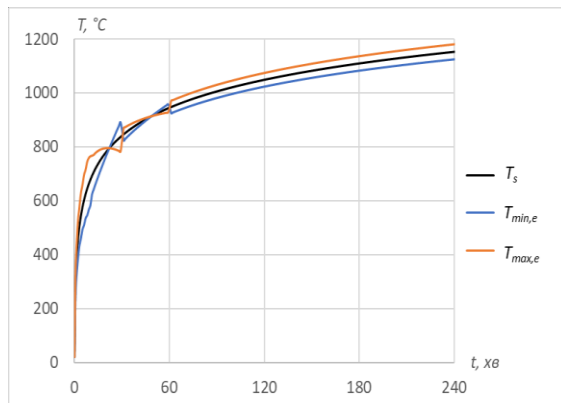


Рисунок 3 – Залежності температури в печі для мінімально та максимально допустимих температурних режимів від проміжку часу вогневого впливу за EN 1363-1 [5]

За даними щодо температур $T_{min,e}$ і $T_{max,e}$, наведеними в табл. 1, через розв'язання прямої задачі теплопровідності із застосуванням даних щодо товщини $d_{p,min}$ (табл. 2) визначали відповідні проміжки часу ($t_{fr,Tmin,e}$ та $t_{fr,Tmax,e}$) до досягнення критичної температури 500 °C. Встановлено, що проміжок часу вогневого впливу до досягнення критичної температури 500 °C ($t_{fr,Tmin,e}$ або $t_{fr,Tmax,e}$) змінюється від 31,4 хв до 246,6 хв і від 27,6 хв до 235,2 хв, відповідно для мінімально та максимально допустимих температурних режимів у печі ($T_{min,e}$ і $T_{max,e}$), наведених у табл. 1. Середні значення цих проміжків часу – 31,54 хв; 92,03 хв; 245,92 хв – для $t_{fr,Tmin,e}$, і 28,03 хв; 88,01 хв; 234,22 хв – для $t_{fr,Tmax,e}$. Відносні стандартні відхили становлять: 0,41 %; 0,15 %; 0,14 % – для $100S_{Tmin,e}/t_{fr,Tmin,e}$, і 0,92 %; 0,16 %; 0,31 % – для $100S_{Tmax,e}/t_{fr,Tmax,e}$. Такі малі величини

відносних відхилів свідчать про несуттєвий вплив коефіцієнта теплопровідності й питомої об'ємної теплоємності вогнезахисного покриття на проміжки часу до досягнення критичної температури 500 °C.

За формулами, аналогічними (3) і (4), визначали дані щодо різниці між значенням проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °C ($t_{fr,Tmin,e}$ або $t_{fr,Tmax,e}$), отриманим за умови, що температура в печі дорівнює $T_{min,e}$ або $T_{max,e}$ (табл. 1), і значенням цього ж проміжку часу t_{fr} ($t_{fr,min} = 30$ хв; $t_{fr,med} = 90$ хв; $t_{fr,max} = 240$ хв) за номінального температурного режиму T_s (табл. 1). Результати цих розрахунків наведено в табл. 14, 15.

Таблиця 14 – Результати розрахунку різниці $\delta_{t,Tmin,e}$

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°C)	λ_p , Вт/(м·°C)	Різниця $\delta_{t,Tmin,e}$ (у %) для:		
		$t_{fr,min}$	$t_{fr,med}$	$t_{fr,max}$
0,1	0,02	5,00	2,44	2,75
0,5	0,02	5,00	2,44	2,46
1,0	0,02	4,67	2,33	2,54
0,1	0,2	4,67	2,33	2,46
0,5	0,2	5,33	2,22	2,33
1,0	0,2	5,00	2,11	2,42
0,1	2,0	5,00	2,11	2,42
0,5	2,0	5,67	2,33	2,25
1,0	2,0	6,00	2,00	2,58

Таблиця 15 – Результати розрахунку різниці $\delta_{t,Tmax,e}$

$c_p \rho_p$, МДж/ (м ³ ·°C)	λ_p , Вт/(м·°C)	Різниця $\delta_{t,Tmax,e}$ (у %) для:		
		$t_{fr,min}$	$t_{fr,med}$	$t_{fr,max}$
0,1	0,02	-5,67	-2,33	-2,79
0,5	0,02	-5,67	-2,33	-2,88
1,0	0,02	-6,00	-2,33	-2,54
0,1	0,2	-6,00	-2,33	-2,58
0,5	0,2	-6,00	-2,00	-2,33
1,0	0,2	-7,00	-2,11	-2,17
0,1	2,0	-7,00	-2,11	-2,17
0,5	2,0	-7,67	-2,00	-2,21

Із аналізу даних, наведених у табл. 14, 15, випливає, що значення різниць $\delta_{t,Tmin,e}$ і $\delta_{t,Tmax,e}$ змінюється від 2,00% до 6,00% і від -2,00% до -7,67% відповідно. Кореляції між цими різницями,

коефіцієнтом теплопровідності λ_p і питомою об'ємною теплоємністю $c_p \rho_p$ вогнезахисного покриття не спостерігається. Існує їхня залежність від проміжку часу t_{fr} , яку наведено на рис. 1. Спостерігається суттєве зменшення величини різниць $\delta_{t,Tmin,e}$ і $\delta_{t,Tmax,e}$ з підвищенням проміжку часу t_{fr} від 30 хв до 120 хв і її подальше незначне збільшення. Цю графічну залежність побудовано за даними щодо середніх значень, які мають різниці $\delta_{t,Tmin,e}$ і $\delta_{t,Tmax,e}$ для проміжків часу $t_{fr,min}$, $t_{fr,med}$, $t_{fr,max}$. Ці середні значення становлять: 5,15%; 2,26%; 2,47% хв – для $\delta_{t,Tmin,e}$, і –6,56%; –2,21%; –2,41% – для $\delta_{t,Tmax,e}$. Стандартні відхили ($S_{Tmin,e}$, $S_{Tmax,e}$) від середніх значень різниць $\delta_{t,Tmin,e}$ і $\delta_{t,Tmax,e}$ становлять: 0,44%; 0,16%; 0,15% – для $t_{fr,Tmin,e}$, і 0,88%; 0,15%; 0,30% – для $t_{fr,Tmax,e}$.

Із порівняння даних щодо різниць $\delta_{t,Tmin,e}$ і $\delta_{t,Tmax,e}$ зі значеннями різниць $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$ (рис. 1) випливає, що максимальна величина відхилу фактичного від номінального проміжку часу до досягнення температури сталі 500 °C для мінімально та максимально допустимих температурних режимів у печі за EN 1363-1 [5] менша, ніж для допустимих температурних режимів за ДСТУ Б В.1.1-4 [6]. Найбільша різниця між цими відхилами спостерігається для малих

значень проміжку часу вогневого впливу t_{fr} , а з його підвищенням ця різниця зменшується. Зокрема, для мінімально допустимого температурного режиму за EN 1363-1 [5] і $t_{fr,min} = 30$ хв різниця $\delta_{t,T}$ на 65% менша, ніж для такого ж режиму за ДСТУ Б В.1.1-4 [6], а для $t_{fr,max} = 240$ хв – менша на 28%.

У табл. 16 наведено вихідні розрахункові дані і результати коригування, проведеного із застосуванням рівняння (8) для фактичних значень проміжку часу до досягнення температури сталі 500 °C ($t_{fr,Tmin,e}$ і $t_{fr,Tmax,e}$), отриманих для мінімально та максимально допустимих температурних режимів за EN 1363-1 [5]. Наведені в цій таблиці дані свідчать про те, що проведене коригування призвело до суттєвого наближення результатів визначення проміжку часу до досягнення критичної температури 500 °C, отриманих за фактичних мінімально і максимально допустимих температурних режимів у печі ($T_{min,e}$ і $T_{max,e}$), до значень цього проміжку часу t_{fr} за номінального температурного режиму T_s . Величина різниці (Δ_t) між коригованими і номінальними значеннями цього проміжку часу не перевищує 1,9%, що є прийнятним для інженерних розрахунків.

Таблиця 16 – Результати коригування даних щодо проміжку часу $t_{fr,T}$

Фактичний проміжок часу $t_{fr,T}$, хв	Відхил d_e , %	Коригований проміжок часу $t_{fr,c}$, хв	Номінальний проміжок часу t_{fr} , хв	Відносна різниця Δ_t , %
31,54	–5,00	29,43	30	–1,90
92,03	–2,50	88,87	90	–1,25
245,92	–2,50	240,37	240	0,15
28,03	5,99	30,02	30	0,05
88,01	2,50	90,06	90	0,06
234,22	2,50	239,94	240	–0,02

За отриманими для мінімально та максимально допустимих температурних режимів в печі за EN 1363-1 [5] і ДСТУ Б В.1.1-4 [6] розрахунковими даними щодо різниць $\delta_{t,Tmin}$ і $\delta_{t,Tmax}$, $\delta_{t,Tmin,e}$ і $\delta_{t,Tmax,e}$ побудовано графічну залежність (рис. 4) різниці $\delta_{t,T}$ (за модулем) між фактичним

проміжком часу до досягнення критичної температури 500 °C і його номінальним значенням від відхилу d_e (за модулем). Для побудови цієї залежності для певних проміжків часу брали середні значення відхилу $|d_e|$, наприклад, $0,5(|d_{e,min}| + |d_{e,max}|)$, і середні значення різниці $|\delta_{t,T}|$, наприклад,

$0,5(|\delta_{t,Tmin}| + |\delta_{t,Tmax}|)$. Зокрема, для проміжку часу 30 хв середнє значення відхилю $|d_e|$ становить 11,13% ($0,5(|-11,13| + |11,13|)$) (дані з табл. 1), а середнє значення різниці $|\delta_{t,T}|$ дорівнює 14,22% ($0,5(|14,70| + |-13,74|)$) (дані з табл. 7). Із рис. 4 випливає, що ця залежність монотонно зростає, її можна описати такою формулою:

$$|\delta_{t,T}| = 0,0374d_e^2 + 0,8617|d_e|. \quad (10)$$

Цю формулу можна застосовувати для інженерних розрахунків з метою оцінювання різниці між фактичним проміжком часу до досягнення критичної температури 500 °С, отриманим під час випробування, і його значенням за номінального температурного режиму. Під час користування формулою (10) необхідно враховувати, що для від'ємних значень відхилю d_e різниця $\delta_{t,T}$ більше нуля, а для додатних значень d_e – ця різниця менше нуля.

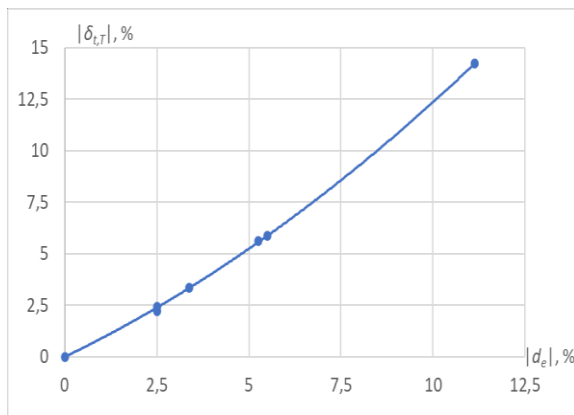


Рисунок 4 – Залежність різниці $\delta_{t,T}$ (за модулем) від величини відхилю d_e (за модулем)

Слід зауважити, що результати, отримані в межах цього дослідження, можуть вважатися за доцільні з практичного погляду, тому що дають змогу обґрунтовано підходити до оцінювання проміжку часу до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту. З погляду теорії, вони дають змогу стверджувати про визначеність впливу

відхилю фактичної температури в печі від номінального режиму на проміжок часу до настання граничного стану цих конструкцій за ознакою втрати несучої здатності та процедури коригування отриманих показників щодо цього проміжку часу для усунення впливу зазначеного відхилю температури на результати випробування, що є певними перевагами проведеного дослідження. Однак варто зазначити, що результати дослідження отримано для вогнезахисного покриття, що має сталі, незалежні від температури, значення коефіцієнта теплопровідності і питомої теплоємності. Насправді значення цих теплофізичних властивостей для пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів залежать від низки параметрів, зокрема від температури [18–19]. Крім того, результати дослідження отримано тільки для стандартного температурного режиму, одношарової системи вогнезахисту і критичної температури 500 °С. Зазначене може призвести до наявності відмінностей в отриманих результатах стосовно залежності різниці між показниками щодо проміжку часу до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності, отриманими за різним відхилом фактичної температури в печі від номінального режиму. Така невизначеність накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися, як недоліки цього дослідження. Неможливість зняти вказані обмеження в цьому дослідженні зумовлює потенційно цікавий напрям подальших розвідок. Вони, зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення залежностей між проміжком часу до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності сталевих конструкцій, оснащених одно- і багатошаровими системами вогнезахисту, в яких застосовують вогнезахисні покриття зі змінними теплофізичними властивостями, відхилом фактичної температури в печі від номінального режиму і значенням критичної температури для різних номінальних температурних режимів пожежі [15; 20].

Зазначене дасть змогу підвищити точність оцінювання вогнестійкості таких сталевих конструкцій, як балки і колони, за різних умов випробування на вогнестійкість.

Висновки та напрями подальших досліджень. Під час проведення дослідження виявлено закономірності щодо впливу відхилення фактичної температури в печі від номінального режиму на результати випробування таких сталевих конструкцій, як балки і колони з одношаровою системою вогнезахисту, в умовах стандартного температурного режиму за EN 1363-1 і ДСТУ Б В.1.1-4.

Встановлено, що різниця між значеннями проміжку часу до досягнення на металевій поверхні сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту критичної температури 500 °С, отриманими за фактичним і номінальним температурними режимами в печі, залежить від проміжку часу вогневого впливу і показника відхилення між цими режимами, і не залежить від теплофізичних властивостей вогнезахисного покриття. Найбільші величини цієї різниці є різними для допустимих відхилів, регламентованих у національному і європейському стандартах

ДСТУ Б В.1.1-4 і EN 1363-1. Для умов національного стандарту з підвищенням проміжку часу вогневого впливу від 30 хв до 240 хв величина цієї різниці зменшується від 14,7% до 3,3%, а для європейського стандарту – від 6,6% до 2,4%.

Визначено процедуру коригування отриманих під час випробування показників щодо проміжку часу до настання граничного стану сталеві конструкції з одношаровою системою вогнезахисту за ознакою втрати несучої здатності, яка дає змогу усунути вплив відхилення фактичного температурного режиму в печі від номінального на результати випробування.

Окреслено напрями подальших досліджень, які орієнтовані на виявлення залежностей між проміжком часу до настання граничного стану за ознакою втрати несучої здатності сталевих конструкцій, оснащених одно- і багатошаровими системами вогнезахисту, в яких застосовують вогнезахисні покриття зі змінними теплофізичними властивостями, відхиленням фактичної температури в печі від номінального режиму і значенням критичної температури для різних номінальних температурних режимів пожежі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. ДСТУ Б В.1.1-13:2007 Захист від пожежі. Балки. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-3:1999, NEQ). Київ : Мінрегіонбуд України, 2007. 6 с.
3. 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.
4. ДСТУ Б В.1.1-14:2007 Захист від пожежі. Колони. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-4:1999, NEQ). Київ : Мінрегіонбуд України, 2007. 8 с.
5. 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.
6. ДСТУ Б В.1.1-4-98* Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Київ : Держбуд України, 2005. 19 с.
7. Wickström U., Hunt S., Lattimer B., Barnett J., Beyler C. Technical comment : ten fundamental principles on defining and expressing thermal exposure as boundary conditions in fire safety engineering. *Fire and Materials*. 2018. Vol. 42(8). P. 985–988.
8. Piloto P.A.G., Mesquita L.M.R., Pereira Alexandre. Thermal analysis in fire-resistance Furnace. *In International Workshop on Fire Protection and Life Safety in Buildings and Transportation Systems*. 2009. Santander. Spain.
9. Gordon M. E. Cooke. Can Harmonisation of Fire Resistance Furnaces be Achieved by Plate Thermometer Control? *Fire Research Station Borehamwood, Herts WD6 2BL. UK Fire safety science – Proceedings of the fourth international symposium*. 1994. P. 1195–1207.
10. Babrauskas V., Williamson R. B., Temperature Measurement in Fire Test Furnaces. *Fire Technology*. 1978. Vol. 14. P. 226–239.
11. Sultan M. A. Fire Resistance Furnace Temperature Measurements : Plate Thermometers vs. Shielded Thermocouples. *Fire Technology*. 2006. Vol. 42. P. 253–267.
12. Sultan M. A. Comparisons of Temperature and Heat Flux in Furnaces Controlled by Different Types of Temperature Sensors. *Journal of ASTM International*. 2010. Vol. 7(1). P. 44–62.
13. Новак С., Добрян 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. ISO 834-1:1999. Fire-resistance tests – Elements of building construction. Part 1 : General requirements. International organization for standardization. 1999. 25 p.
15. 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.
16. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ : Мінрегіон України, 2016. 111 с.
17. Новак С., Дридж В., Добростан О., Новак М. Вплив теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на тепловий стан сталевих колон за стандартного температурного режиму. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(13). С. 88–110.
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 : 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.
20. 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.

REFERENCES

1. 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. [in English].
2. DSTU B V.1.1-13:2007 Zakhyst vid pozhezh. Balky. Metod vyprobuвання na vohnestiikist (EN 1365-3:1999, NEQ). [Fire protection. Beams. Fire resistance test method]. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2007. 6 s. [in Ukrainian].
3. 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. [in English].
4. DSTU B V.1.1-14:2007 Zakhyst vid pozhezh. Kolony. Metod vyprobuвання na vohnestiikist (EN 1365-4:1999, NEQ). [Fire protection. Columns. Fire resistance test method]. Kyiv : Minrehionbud Ukrainy, 2007. 8 s. [in Ukrainian].
5. 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. [in English].
6. DSTU B V.1.1-4-98*. Zakhyst vid pozhezh. Budivelni konstrukttsii. Metody vyprobuвання na vohnestiikist. Zahalni vymohy. [Fire protection. Building constructions. Test methods for firefighters. General requirement]. Kyiv: Derzhbud Ukrainy, 2005. 19 s. [in Ukrainian].
7. Wickström, U., Hunt, S., Lattimer, B., Barnett, J., Beyler, C. Technical comment: ten fundamental principles on defining and expressing thermal exposure as boundary conditions in fire safety engineering. *Fire and Materials*. 2018. Vol. 42(8). P. 985–988. [in English].
8. Piloto, P.A.G., Mesquita, L.M.R., Pereira, Alexandre. Thermal analysis in fire-resistance Furnace. In International Workshop on Fire Protection and Life Safety in Buildings and Transportation Systems. 2009. Santander. Spain. [in English].
9. Gordon, M. E. Cooke. Can Harmonisation of Fire Resistance Furnaces be Achieved by Plate Thermometer Control? Fire Research Station Borehamwood, Herts WD6 2BL. UK Fire safety science – Proceedings of the fourth international symposium. 1994. P. 1195–1207. [in English].
10. Babrauskas, V., Williamson, R. B., Temperature Measurement in Fire Test Furnaces. *Fire Technology*. 1978. Vol. 14. P. 226–239. [in English].
11. Sultan M. A. Fire Resistance Furnace Temperature Measurements : Plate Thermometers vs. Shielded Thermocouples. *Fire Technology*. 2006. Vol. 42. P. 253–267.
12. Sultan, M. A. Comparisons of Temperature and Heat Flux in Furnaces Controlled by Different Types of Temperature Sensors. *Journal of ASTM International*. 2010. Vol. 7(1). P. 44–62. [in English].
13. Novak, S., Dobrostan, O., Pustovy, M. Vplyv temperaturnoho rezhymu pozhezh na promizhok chasu zberezhenosti vohnestiikosti stalevykh konstrukttsii. [The influence of the temperature regime of the fire on the time interval of preservation of fire resistance of steel structures]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2023. № 1(15). S. 18–31. [in Ukrainian].
14. ISO 834-1:1999. Fire-resistance tests – Elements of building construction. Part 1: General requirements. International organization for standardization. 1999. 25 p. [in English].
15. 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].
16. DSTU-N B V.2.6-211:2016. Proektuvannya stalevykh konstrukttsii. Rozrakhunok konstrukttsii na vohnestiikist [Design of steel structures. Calculation of structures for fire resistance]. Kyiv: Minrehion Ukrainy. 2016. 61 s. [in Ukrainian].
17. Novak S., Dridzh V., Dobrostan O., Novak M. Vplyv teplofizychnykh vlastyvostei vohnezakhysnykh materialiv na teplovy stan stalevykh kolon za standartnoho temperaturnoho rezhymu [The influence of thermophysical properties of flame retardant materials on the thermal state of steel columns under a standard temperature regime]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2022. № 1(13). S. 88–110. [in Ukrainian].
18. Krukovskij P., Novak S., Poklonskij V., Eremenko S., Frolov G. Ocenka 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 Franko Pak. 2021. 148 s. [in Russian].
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. [in English].
20. 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. [in English].

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE DEVIATION IN THE FURNACE FROM THE NOMINAL REGIME ON THE RESULTS OF TESTING STEEL STRUCTURES FOR FIRE RESISTANCE

S. Novak¹, M. Novak², M. Pustovyi³

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

²*The National University of Food Technologies, Ukraine*

³*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chornobyl of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

KEYWORDS: ANNOTATION

fire resistance limit state, temperature deviation, critical temperature, regime, time period of fire exposure, steel structure, thermal properties.

This study is devoted to the evaluation of the time interval until the onset of the limit state of steel structures as a sign of loss of bearing capacity, taking into account the presence of deviation of the actual temperature in the furnace from the nominal regime during their fire resistance test according to national and European standards. The purpose of the study was to identify the dependence between this time interval for such steel structures as beams and columns with a single-layer fire protection system, and the deviation of the actual temperature in the furnace from the nominal regime, as well as to determine the procedure for adjusting the obtained indicators with respect to this time interval to eliminate the influence of the specified deviation temperature on the test results. With the application of the computational experiment method, which is based on solving a direct one-dimensional problem of thermal conductivity, the data on the difference between the values of this time interval, obtained at the minimum and maximum permissible temperatures in the furnace, and the value of this time interval for the nominal temperature regime were determined. Laws have been revealed regarding the influence of the deviation of the actual temperature in the furnace from the nominal regime on the test results of steel structures under the conditions of the standard temperature regime according to EN 1363-1:2020 and DSTU B V.1.1-4-98*. It was established that the difference between the values of the time interval until reaching the critical temperature of 500 °C on the metal surface of a steel structure with a single-layer fire protection system, obtained according to the actual and nominal temperature regimes in the furnace, depends on the time interval of fire exposure and the deviation index between these regimes, and not depends on the thermal properties of the fire protective coating. The largest values of this difference are different for the permissible deviations regulated in national and European standards. For the conditions of the national standard, with an increase in the fire exposure time from 30 min to 240 min, the value of this difference decreases from 14,7% to 3,3%, and for the European standard, it decreases from 6,6% to 2,4%. The procedure for adjusting the indicators obtained during the test regarding the time interval until the onset of the limit state of a steel structure with a single-layer fire protection system based on the loss of load-bearing capacity is determined, which allows to eliminate the influence of the deviation of the actual temperature regime in the furnace from the nominal one on the test results.