

УДК 614.841.45

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.2.104.120>

Максим ПУСТОВИЙ¹ (ORCID: 0000-0003-1434-4296),
Ігор МАЛАДИКА¹, канд. техн. наук, доцент (ORCID: 0000-0001-8784-2814),
Сергій НОВАК², канд. техн. наук, старший науковий співробітник
(ORCID: 0000-0001-7087-318X),

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України,

²Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

ОЦІНЮВАННЯ СПІВВІДНОШЕННЯ НЕОБХІДНОЇ МІНІМАЛЬНОЇ ТОВЩИНИ ВОГНЕЗАХИСТУ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА РІЗНИМИ НОМІНАЛЬНИМИ ТЕМПЕРАТУРНИМИ РЕЖИМАМИ ПОЖЕЖІ

Зважаючи на недостатню визначеність і практичну значимість даних щодо співвідношення між необхідною мінімальною товщиною систем вогнезахисту сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі, на теперішній час актуальними є дослідження, спрямовані на подальше удосконалення і розвиток методів оцінювання цієї товщини за різними рівнями теплового впливу, які відображають різні сценарії пожежі, а також методів визначення зазначеного співвідношення. Проведене дослідження ставило за мету обґрунтування методу визначення цього співвідношення, придатного для отримання достовірних результатів оцінювання пасивних і реактивних систем вогнезахисту сталевих конструкцій. Для досягнення цієї мети було поставлено завдання щодо обґрунтування складових зазначеного методу і його процедур.

Сутність запропонованого в даній роботі методу полягає у проведенні випробування за стандартного температурного режиму набору навантажених і ненавантажених конструкцій, визначенні за отриманими експериментальними даними теплофізичних властивостей застосованого вогнезахисного матеріалу, розрахунку за отриманими даними щодо цих властивостей необхідної мінімальної товщини вогнезахисту за різними номінальними температурними режимами пожежі й співвідношення між цими товщинами. У цьому методі застосовано низку процедур, деякі з них є стандартизованими, інші – не стандартизовані. До стандартизованих відносяться процедури вибирання і проведення випробування зразків конструкцій, коригування проміжків часу до досягнення проєктних температур через відмінність у параметрах зразків для випробування і з урахуванням показників щодо «здатності до зчеплення», а також вибирання діапазону і параметрів сталевих конструкцій для визначення значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисту. Нестандартизовані процедури застосовують для коригування проміжків часу для навантажених конструкцій і коротких конструкцій для порівняння, нагрівання яких здійснювали під час різних випробувань, а також процедур визначення теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу і розрахунку необхідної мінімальної товщини вогнезахисту. Наведено обґрунтування застосування зазначених процедур в запропонованому методі.

Ключові слова: вогнезахисний матеріал, система вогнезахисту, сталева конструкція, температурний режим, теплофізичні властивості, товщина вогнезахисту.

Постановка проблеми. Вогнестійкість несучих і огорожувальних будівельних конструкцій потрібно оцінювати, забезпечуючи один чи більше рівнів теплового впливу, які відображають різні сценарії пожежі [1]. Для класифікації або перевіряння вогнестійкості будівельних конструкцій за сценарієм умовної пожежі застосовують такі номінальні температурні режими, як стандартний температурний режим, температурний режим зовнішньої пожежі й режим вуглеводневої пожежі [2].

Експериментальні методи оцінювання вогнестійкості сталевих конструкцій (балок і колон з нанесеними системами вогнезахисту або без них) за зазначеними номінальними температурними режимами пожежі подано в EN 1365-3 [3] і EN 1365-4 [4]. Ці методи призначено для визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості (несучої здатності) сталевих конструкцій за стандартного або іншими номінальними температурними режимами. Результати, отримані за цими методами, дозволяють визначати співвідношення між значеннями проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій, оснащених системою вогнезахисту конкретної торгової марки, за різними номінальними температурними режимами пожежі. Однак вони не прийнятні для визначення важливого для практики показника, яким є співвідношення між необхідною мінімальною товщиною системи вогнезахисту конкретної торгової марки за різними номінальними температурними режимами пожежі.

Методи визначення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту для сталевих конструкцій, оснащених пасивними і реактивними системами вогнезахисту різних типів, наведено в EN 13381-4 [5] і EN 13381-8 [6]. Ці методи призначено для оцінювання цієї товщини для широкого діапазону нормованих параметрів сталевих конструкцій (коефіцієнта поперечного перерізу, проєктної (критичної) температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості) тільки за стандартного температурного режиму. Для інших номінальних температурних режимів пожежі аналогічних стандартних методів визначення цієї товщини вогнезахисту для сталевих конструкцій не встановлено. Водночас в EN 1993-1-2 [7] подано розрахункові процедури, прийнятні для визначення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту цих конструкцій за різними температурними режимами пожежі. Для їхнього застосування необхідно використовувати властивості вогнезахисних матеріалів, оцінені з використанням процедур, що наведені в EN 13381-4 [5] або EN 13381-8 [6].

Зважаючи на наявну невизначеність і практичну значимість даних щодо співвідношення між необхідною мінімальною товщиною систем вогнезахисту конкретних торгових марок за різними номінальними температурними режимами пожежі, актуальним слід вважати дослідження, спрямовані на подальше удосконалення і розвиток методів оцінювання необхідної товщини вогнезахисту сталевих конструкцій за різними рівнями теплового впливу, які відображають різні сценарії пожежі, і визначення зазначеного співвідношення.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій залежить від рівня теплового впливу на них під час пожежі. Для сценарію умовної пожежі цей рівень є найбільший за температурного режиму вуглеводневої пожежі й найменший за температурного режиму зовнішньої пожежі [8]. Дослідженням теплового стану сталевих

конструкцій з одношаровою системою вогнезахисту, які мають однакові параметри (коефіцієнт поперечного перерізу, критичну температуру, товщину і теплофізичні властивості вогнезахисту), встановлено, що за температурного режиму вуглеводневої пожежі проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій на (42,0–56,2) % менший ніж за температурного режиму зовнішньої пожежі [9]. Також визначено, що різниця між проміжками часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій за температурного режиму вуглеводневої пожежі й стандартного температурного режиму знаходиться в діапазоні від –8,8 % до –58,3 %, а за температурного режиму зовнішньої пожежі й стандартного температурного режиму – в діапазоні від 11,0 % до 108,4 %. Однак слід зазначити, що в даній роботі не наведено дані щодо співвідношення між необхідною мінімальною товщиною досліджуваної системи вогнезахисту за різними номінальними температурними режимами пожежі. Для подолання цієї проблеми в роботі [10] проведено чисельне дослідження впливу номінального температурного режиму пожежі на необхідну мінімальну товщину одношарової системи вогнезахисту для сталевих конструкцій з широким діапазоном параметрів. Показано, що за температурного режиму вуглеводневої пожежі ця товщина на (29,5–683) % більша ніж за температурного режиму зовнішньої пожежі. Визначено, що різниця між необхідною мінімальною товщиною вогнезахисту за температурного режиму вуглеводневої пожежі й стандартного температурного режиму знаходиться в діапазоні від 5,74 % до 214 %, а за температурного режиму зовнішньої пожежі й стандартного температурного режиму – в діапазоні від –7,52 % до –64,7 %. Незважаючи на практичну значущість таких результатів, в даній роботі не розглянуто в достатній мірі вплив номінальних температурних режимів пожежі на необхідну мінімальну товщину систем вогнезахисту для сталевих конструкцій, в яких застосовують вогнезахисні матеріали конкретних торгових марок зі змінним коефіцієнтом теплопровідності. В ній є посилання на низку робіт, в яких досліджували такий вплив, але тільки для окремих параметрів сталеві конструкції, а не для їх широкого діапазону. Зокрема в роботі [11] оцінювали співвідношення між необхідною мінімальною товщиною одношарової системи з вогнезахисним покриттям «Amotherm Steel Wb», що спучується, за температурного режиму вуглеводневої пожежі й стандартного температурного режиму. Встановлено, що за критичної температури 500 °C і проміжку часу збереженості вогнестійкості 30 хв значення необхідної мінімальної товщини цього вогнезахисного покриття, визначені за різного коефіцієнту поперечного перерізу (від 8 м⁻¹ до 1000 м⁻¹), за температурного режиму вуглеводневої пожежі приблизно у 2 рази більші ніж за стандартного температурного режиму. В роботі [12] виконували аналогічне дослідження систем з вогнезахисним покриттям «Ньюспрей» і піщано-цементною штукатуркою за температурного режиму вуглеводневої пожежі й стандартного температурного режиму і критичної температури 500 °C.

В роботі [13] подано аналіз методів, придатних для визначення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту для сталевих конструкцій, оснащених пасивними і реактивними системами вогнезахисту різних типів. Значну увагу в даній роботі приділено методам визначення цієї товщини вогнезахисту, наведеним в EN 13381-4 [5] і EN 13381-8 [6], а також методам розрахунку теплового стану сталевих конструкцій в умовах пожежі, поданим в Єврокод 1 [2] і Єврокод 3 [7]. Однак слід зазначити, що в даній роботі не наведені методи, за якими можна визначати співвідношення між необхідною мінімальною товщиною системи вогнезахисту конкретної торгової марки за різними номінальними

температурними режимами пожежі, а тільки зазначено процедури, прийнятні для цих методів.

Тому є підстави вважати, що недостатня визначеність методів оцінювання співвідношення між необхідною мінімальною товщиною вогнезахисту сталевих конструкцій за різними номінальними температурними режимами пожежі обумовлює необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

Постановка задачі та її розв'язання. За мету дослідження ставилось обґрунтування методу визначення співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини системи вогнезахисту сталевих конструкцій конкретної торгової марки за різними номінальними температурними режимами пожежі, придатного для отримання достовірних результатів щодо цього співвідношення для пасивних і реактивних систем вогнезахисту.

Для досягнення цієї мети було поставлено завдання щодо обґрунтування складових методу і його процедур, придатних для визначення співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини одношарової пасивної або реактивної системи вогнезахисту сталевих конструкцій конкретної торгової марки за різними номінальними температурними режимами пожежі.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів.

Метод дослідження. Застосовано метод дослідження, складовими якого є аналізування, порівняння, узагальнення положень європейських і національних нормативних документів та наукових публікацій у провідних періодичних і спеціалізованих світових виданнях, що стосуються методів визначення вогнестійкості сталевих конструкцій і необхідної мінімальної товщини їхнього вогнезахисту за різними номінальними температурними режимами пожежі.

Результати та їх обговорення. Метод визначення співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини системи вогнезахисту сталевих конструкцій конкретної торгової марки за різними номінальними температурними режимами пожежі, який запропоновано в цій роботі, ґрунтується на положеннях таких нормативних документів: EN 13381-4 [5], EN 13381-8 [6], EN 1991-1-2 [2], EN 1993-1-2 [7], EN 1365-3 [3], EN 1365-4 [4], ДСТУ Б В.1.1-17 [14] і ДСТУ-Н Б В.2.6-211 [15]. Сутність цього запропонованого метода полягає у проведенні випробування за стандартного температурного режиму набору навантажених і ненавантажених конструкцій, визначенні за отриманими експериментальними даними теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, розрахунку за отриманими даними щодо цих властивостей необхідної мінімальної товщини вогнезахисту за різними номінальними температурними режимами пожежі й співвідношення між цими товщинами.

На першому етапі цього методу, залежно від типу застосовної системи вогнезахисту (пасивна чи реактивна) і обсягів оцінювання, згідно з 6.6 EN 13381-4 [5] (для пасивних систем вогнезахисту) або 6.6 EN 13381-8 [6] (для реактивних систем вогнезахисту) здійснюють вибирання зразків для випробування, до яких відносять:

– навантажені і ненавантажені балки або колони, які призначені для отримання даних щодо здатності системи вогнезахисту залишатися неушкодженою і такою, що зчеплена з ділянками сталевих конструкцій (зберігати здатність до зчеплення). Загальна довжина кожної навантаженої балки має бути такою, щоб забезпечувалося нагрівання її ділянки завдовжки не менше ніж 4000 мм. Висота обігрівних ділянок усіх навантажених колон має бути не менше ніж 3000 мм. Високі ненавантажені колони повинні мати висоту 2000 мм ± 50 мм.

Мінімальна довжина коротких (ненавантажених) балок і колон, що використовують як конструкцію для порівняння, має дорівнювати (1000 ± 50) мм;
 – короткі (ненавантажені) конструкції (балки і колони), які призначені для оцінювання теплових показників системи вогнезахисту, довжина яких має дорівнювати (1000 ± 50) мм.

Як приклад, в таблиці 1, складеної згідно з EN 13381-4 [5], наведено дані щодо мінімальної кількості зразків для випробування пасивних систем вогнезахисту сталевих конструкцій двотаврового профілю.

Таблиця 1 - Мінімальна кількість зразків для випробування пасивних систем вогнезахисту, які містять вогнезахисні панелі, плити, мати або покриття, що наносять методом розпилювання

Застосовність	Набір зразків для випробування (номер)	Навантажені балки	Навантажені колони	RB ^a	RC ^d	SIB ^b	SIC ^c
Балки	1	2		2		11	
Колони	2		2		2		11
Балки і колони	3	2		2			13
Балки і колони	4	2		2		11	13
^a «RB» означає балки для порівняння							
^b «SIB» означає короткі балки для оцінювання							
^c «SIC» означає короткі колони для оцінювання							
^d «RC» означає колони для порівняння							

На навантажених балках і колонах, високих ненавантажених колонах, а також коротких балках і колонах для порівняння застосовують вогнезахист з мінімальною d_{\min} і максимальною d_{\max} товщиною. Короткі балки і колони для оцінювання вибирають з таким розрахунком, щоб охопити встановлені діапазони значень товщини вогнезахисту, коефіцієнта поперечного перерізу та проміжку часу збереженості вогнестійкості. Як приклад, в таблиці 2, складеної згідно з EN 13381-4 [5], наведено дані щодо параметрів коротких конструкцій двотаврового профілю (балок або колон), включаючи конструкції для порівняння, які мають бути для випробування пасивних систем вогнезахисту. У цій таблиці показано діапазони коефіцієнта поперечного перерізу і коефіцієнта товщини вогнезахисту, в яких мають бути параметри ненавантажених зразків для випробування. За даними цієї таблиці, користуючись формулами (1) і (2), обчислюють фактичні значення коефіцієнта поперечного перерізу A_p/V й товщини вогнезахисту d_p , які мають бути для коротких конструкцій.

Таблиця 2 - Діапазони коефіцієнта поперечного перерізу і коефіцієнта товщини вогнезахисту для ненавантажених зразків для випробування

Діапазон коефіцієнта поперечного перерізу (K_s)	Діапазон коефіцієнта товщини вогнезахисту (K_d)			
	0,0 (d_{\min})	Від 0,2 до 0,5	Від 0,5 до 0,8	1,0 (d_{\max})
0,0 (s_{\min})	✓	✓	✓	

Від 0,2 до 0,5	✓		✓	✓
Від 0,5 до 0,8	✓	✓	✓	✓
1,0 (s_{\max})		✓	✓	✓

$$d_p = K_d(d_{\max} - d_{\min}) + d_{\min}; \quad (1)$$

$$A_p/V = K_s((A_p/V)_{\max} - (A_p/V)_{\min}) + (A_p/V)_{\min}, \quad (2)$$

де d_p – товщина вогнезахисту за коефіцієнта K_d ;
 d_{\max} – максимальна товщина вогнезахисту за умови, що $K_d = 1$;
 d_{\min} – мінімальна товщина вогнезахисту за умови, що $K_d = 0$;
 A_p/V – коефіцієнт поперечного перерізу за коефіцієнта K_s ;
 $(A_p/V)_{\max}$ – максимальний коефіцієнт поперечного перерізу за умови, що $K_s = 1$;
 $(A_p/V)_{\min}$ – мінімальний коефіцієнт поперечного перерізу за умови, що $K_s = 0$.

На наступному етапі на металеву поверхню усіх зразків для випробування встановлюють термопари і наносять систему вогнезахисту у спосіб, що відповідає практиці. Здійснюють встановлення і кріплення зразків для випробування в печі. Навантажені балки закріплюють без використання додаткових елементів з врахуванням допуску на вільне розширення й прогин балки у вертикальному напрямку згідно з вимогами EN 1365-3 [3]. Для навантажених колон здійснюють їхнє належне закріплення, розміщення та вирівнювання усередині печі згідно з вимогами EN 1365-4 [4]. Ненавантажени балки і колони закріплюють до плит, якими викладено покриття печі. Іншим альтернативним способом для ненавантажених колон є їхнє встановлювання на основу печі (безпосередньо або на цоколі).

Певну кількість коротких конструкцій і навантажених двотаврових або порожнистих конструкцій, які захищено системою вогнезахисту, нагрівають у печі за стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 [16]. Для забезпечення дотримання заданого температурного режиму в печі здійснюють регулювання кількості зразків для випробування усередині неї, а також місць їхнього встановлення. Зазвичай для печі з розмірами 4 м × 3 м і завглибшки 2 м щільність її завантаження, за якої не виникає негативних впливів, може досягати 45 кг/м³ [5]. Через це для забезпечення дотримання стандартного температурного режиму нагрівання зразків в печі зазвичай здійснюють під час кількох випробувань. До початку нагрівання в печі до зразків навантажених конструкцій прикладають випробувальне навантаження, величина якого для балок складає 60 % проектного моменту опору, а для колон – 60 % проектного значення міцності на повздовжній згин згідно з EN 1993-1-1 [17]. Під час випробувань визначають дані щодо температури всіх зразків до моменту досягнення максимальної температури, що потрібна відповідно до обсягу оцінювання.

На наступному етапі за даними щодо температури на металевій поверхні зразка (далі – температури сталі або температури зразка), отриманими під час випробувань навантажених і ненавантажених конструкцій, визначають проміжки часу t_{exp} до досягнення заданих (проектних) значень температури, які становлять від 350 °C до 700 °C (з кроком 50 °C), і їхні кориговані величини.

У разі, якщо нагрівання навантаженої конструкції або високої ненавантаженої колони та короткої конструкції для порівняння з аналогічними параметрами здійснювали під час різних випробувань, то можливі відмінності у фактичних температурних режимах у печі й початковій температурі зразків цих

конструкцій під час випробувань. Такі відмінності впливають на значення проміжку часу до досягнення проектної температури, про що свідчать результати досліджень, подані в роботах [18–20]. Тому на цьому етапі здійснюють коригування проміжків часу t_{exp} до досягнення цими конструкціями проектних температур, приводячи ці проміжки до номінальних значень стандартного температурного режиму в печі й початкової температури зразків. Це коригування здійснюють за процедурами, наведеними в роботах [18–20].

У разі, якщо навантажена конструкція або висока ненавантажена колона та коротка конструкція для порівняння з аналогічними параметрами мають різні коефіцієнти поперечного перерізу i (або) різні товщини вогнезахисту, проміжок часу до досягнення короткою конструкцією кожного зі значень проектної температури коригують згідно з додатком D EN 13381-4 [5] (для пасивних систем вогнезахисту) або додатком D EN 13381-8 [6] (для реактивних систем вогнезахисту) для тих самих значень коефіцієнта поперечного перерізу й товщини вогнезахисту, якими характеризується навантажена конструкція або висока ненавантажена колона. За результатами цього коригування визначають проміжок часу $t_{\text{exp,c}}$.

У разі, якщо показники щодо проміжків часу $t_{\text{exp,c}}$ (або t_{exp} – у разі, якщо коригування виконувати не було потреби) за мінімальної та (або) максимальної товщини вогнезахисту на навантаженій конструкції та (або) високій ненавантаженій колоні менші за показники, отримані з використанням короткої конструкції для порівняння з аналогічними параметрами, то проміжки часу до досягнення проектної температури для всіх коротких конструкцій коригують з урахуванням показників щодо «здатності до зчеплення». Це виконують, порівнюючи проміжок часу до досягнення навантаженою конструкцією та (або) високою ненавантаженою колоною проектної температури з проміжком часу до її досягнення короткою конструкцією для порівняння з аналогічними параметрами. Коригований з урахуванням показників щодо «здатності до зчеплення» проміжок часу t_c для короткої конструкції дорівнює добутку коефіцієнта перерахунку й проміжку часу t_{exp} (а для короткої конструкції для порівняння це може бути $t_{\text{exp,c}}$) до досягнення нею проектної температури. Коефіцієнт перерахунку розраховують для кожного значення проектної температури, необхідного для прийнятого обсягу оцінювання. Це коригування з урахуванням показників щодо «здатності до зчеплення» здійснюють за процедурою, наведеною в додатку D EN 13381-4 [5] (для пасивних систем вогнезахисту) або додатку D EN 13381-8 [6] (для реактивних систем вогнезахисту).

На наступному етапі за даними щодо температури, отриманими під час випробування коротких конструкцій, і їх коригованих проміжків часу t_c (або t_{exp} – у разі, якщо коригування з урахуванням показників щодо «здатності до зчеплення» виконувати не було потреби) визначають теплофізичні властивості застосовного вогнезахисного матеріалу – його коефіцієнт теплопровідності λ_p , залежний від температури, і питому об'ємну теплоємність $c_p \square_p$, як константу. Це визначення здійснюють за процедурою, заснованою на розв'язанні оберненої задачі теплопровідності й положеннях, наведених в додатку Л ДСТУ Б В.1.1-17 [14], додатку П.2 ДСТУ-Н Б В.2.6-211 [15], додатку Е EN 13381-4 [5], додатку Е EN 13381-8 [6] і роботах [21–23]. Шляхом чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь (2)–(10) [23], які є складовими одномірної математичної моделі процесу теплопровідності сталевих конструкцій з одношаровою системою вогнезахисту за умов впливу стандартного температурного режиму, визначають такі значення λ_p і $c_p \square_p$ в рівнянні (3), за яких середньоквадратичний відхил F

розрахункових $\theta_{a,calc}$ від експериментальних $\theta_{a,exp}$ значень температури сталі для коротких конструкцій є мінімальний.

$$c_p \rho_p \frac{\partial \theta_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} \right), \quad (3)$$

де x – координата;

t – проміжок часу, що відраховують від початку нагрівання;

θ_p – температура в шарі вогнезахисного матеріалу;

c_p – питома масова теплоємність вогнезахисного матеріалу;

ρ_p – густина вогнезахисного матеріалу;

λ_p – коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного матеріалу.

Для розв'язання оберненої задачі теплопровідності у зазначеній вище постановці застосовують комп'ютерну програму FRIEND, що ґрунтується на чисельному розв'язку системи диференціальних рівнянь методом скінченних різниць за неявною схемою апроксимації, ітераційному методі Ньютона-Гаусса пошуку мінімуму середньоквадратичного відхилення F та методі регуляризації Тихонова [21].

Процедура визначення теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу є такою. На першому кроці за комп'ютерною програмою FRIEND розв'язанням оберненої задачі теплопровідності проводять визначення λ_p і $c_p \rho_p$ як констант. Значення знайдених констант використовують як нульове наближення для наступного кроку, на якому здійснюють визначення $c_p \rho_p$ як константи, а для λ_p застосовують сплайн-апроксимацію першого порядку (лінійну залежність від температури) з двома вузловими точками за температури, які відповідають мінімальній і максимальній температурі в печі під час випробування. Отриманий розв'язок використовують як нульове наближення для третього кроку, на якому проводять пошук $c_p \rho_p$ як константи, а для λ_p застосовують ту саму сплайн-апроксимацію, але вже з трьома вузловими точками за температури. За третю точку беруть середнє значення температур двох вузлових точок на попередньому кроці. У подальшому здійснюють збільшення кількості вузлових точок для цієї сплайн-апроксимації λ_p і це виконують до кроку, на якому припиняється зменшення відхилення F . Рішенням оберненої задачі теплопровідності є теплофізичні властивості вогнезахисного матеріалу (значення коефіцієнта теплопровідності у вузлових точках $\lambda_p(\theta_{p,1}), \lambda_p(\theta_{p,2}), \dots, \lambda_p(\theta_{p,n})$ і сталі значення питомої об'ємної теплоємності $c_p \rho_p$), за яких відхилення F має найменшу величину. Визначають прийнятність отриманого рішення, виходячи з таких вимог (критеріїв прийнятності) [5; 6].

а) Для кожної короткої конструкції жоден розрахунковий (прогнозований) проміжок часу t_{calc} до досягнення проектної температури, у хвилинах, визначений для отриманого рішення оберненої задачі теплопровідності з точністю до однієї десятої, не повинен перевищувати коригованого проміжку часу t_c (або t_{exp} – у разі, якщо коригування з урахуванням показників щодо «здатності до зчеплення» виконувати не було потреби) більше ніж на 15 %.

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

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

Якщо одна або більше з цих трьох вимог не виконуються, здійснюють коригування значень $\lambda_p(\theta_{p,1}), \lambda_p(\theta_{p,2}), \dots, \lambda_p(\theta_{p,n})$, користуючись такою формулою:

$$\lambda_{p,c}(\theta_{p,i}) = \lambda_p(\theta_{p,i}) + K\lambda_{sp}, \quad (4)$$

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

$\lambda_p(\theta_{p,i})$ – значення коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу за в i -ій вузловій точці за температури $\theta_{p,i}$, визначене для отриманого рішення оберненої задачі теплопровідності;

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

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

K – коефіцієнт;

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

$$\lambda_{sp} = \sum_{i=1}^n \lambda_p(\theta_{p,i}) / 10n. \quad (5)$$

За формулами (4)–(5) і величини коефіцієнта $K = 0,1$ обчислюють кориговані значення коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу в усіх вузлових точках. За отриманими таким чином даними щодо $\lambda_{p,c}(\theta_{p,1}), \lambda_{p,c}(\theta_{p,2}), \dots, \lambda_{p,c}(\theta_{p,n})$, для кожної короткої конструкції розв'язанням за комп'ютерною програмою FRIEND прямої задачі теплопровідності [23] розраховують температуру сталі і визначають розрахункові проміжки часу t_{recalc} до досягнення проектних температур. Всі значення t_{recalc} порівнюють з коригованими проміжками часу t_c (або t_{exp} – у разі, якщо коригування з урахуванням показників щодо «здатності до зчеплення» виконувати не було потреби) за вищенаведеними критеріями прийнятності.

У разі, якщо всі три критерії виконуються, то зменшують величину коефіцієнта K у 2 рази і здійснюють аналогічні розрахунки та порівняння з коригованими проміжками часу. Якщо всі три критерії і для цієї ітерації виконуються, то зменшують величину коефіцієнта K у 3 рази і здійснюють відповідні розрахунки та порівняння. Цю процедуру продовжують до ітерації, за якої хоч один з критеріїв прийнятності не виконується. Значення $\lambda_{p,c}(\theta_{p,1}), \lambda_{p,c}(\theta_{p,2}), \dots, \lambda_{p,c}(\theta_{p,n})$, які використовували на останній ітерації, за якої всі три критерії виконуються, вважають такими, що відображають властивості вогнезахисного матеріалу.

У разі, якщо за величини коефіцієнта $K = 0,1$ хоч один з критеріїв прийнятності не виконується, то збільшують цю величину у 2, 3 і більше разів і здійснюють аналогічні розрахунки та порівняння з коригованими проміжками часу до настання ітерації, за якої ці всі критерії виконуються. Значення $\lambda_{p,c}(\theta_{p,1}), \lambda_{p,c}(\theta_{p,2}), \dots, \lambda_{p,c}(\theta_{p,n})$, які використовували на ітерації, за якої всі три критерії виконуються, вважають такими, що відображають властивості вогнезахисного матеріалу.

На наступному етапі, користуючись коригованими величинами коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,c}(\theta_{p,1}), \lambda_{p,c}(\theta_{p,2}), \dots, \lambda_{p,c}(\theta_{p,n})$ і сталим значенням питомої об'ємної теплоємності $c_p \square_p$, розв'язанням за комп'ютерною програмою FRIEND прямої задачі теплопровідності [23] розраховують температуру сталі і визначають

значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту $d_{p,min}$ за стандартного температурного режиму для сталевих конструкцій, які мають широкий номінальний діапазон їх параметрів (коефіцієнта поперечного перерізу, проектної (критичної) температури і проміжку часу збереженості вогнестійкості). Під час цих розрахунків шляхом розв'язання прямої задачі теплопровідності за різними наближеннями товщини вогнезахисту визначають таке її мінімальне значення $d_{p,min}$, за якого для певного номінального проміжку часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,requ}$ розрахункова температура сталі θ_a дорівнює проектній температурі θ_D . Номінальний діапазон і відповідні значення параметрів сталевих конструкцій для цих розрахунків обирають згідно з EN 13381-4 [5] (для пасивних систем вогнезахисту) або EN 13381-8 [6] (для реактивних систем вогнезахисту). Отримані розрахункові дані наводять в табличній формі (приклад – таблиця 3).

Таблиця 3 - Приклад подання даних щодо товщини вогнезахисту $d_{p,min}$

Проміжок часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,requ}$, хв								
Проектна температура θ_D , °C	350	400	450	500	550	600	650	700
Коефіцієнт поперечного перерізу A_p/V , м ⁻¹	Мінімальна товщина вогнезахисту $d_{p,min}$, необхідна для підтримування температури сталі нижче проектного значення, мм							
40								
50								
60								
...								
280								
290								
300								

На наступному етапі, користуючись коригованими величинами коефіцієнта теплопровідності $\lambda_{p,c}(\theta_{p,1})$, $\lambda_{p,c}(\theta_{p,2}), \dots, \lambda_{p,c}(\theta_{p,n})$ і сталим значенням питомої об'ємної теплоємності $c_p \square_p$, таким же чином, як і на попередньому етапі визначають значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту $d_{p,min,HC}$ і $d_{p,min,ef}$ за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі. Відмінностями цих розрахунків від розрахунку товщини вогнезахисту $d_{p,min}$ за стандартного температурного режиму є те, що під час розв'язання за комп'ютерною програмою FRIEND прямих задач теплопровідності замість значень температури нагрівального газового середовища за стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1 [16] використовують значення температури цього середовища за температурними режимами вуглеводневої і зовнішньої пожежі згідно з EN 1363-2 [8]. Крім цього під час розрахунків за температурного режиму вуглеводневої пожежі замість значення коефіцієнта тепловіддачі конвекцією на обігрівній поверхні вогнезахисту, яке за стандартного температурного режиму і температурного режиму зовнішньої пожежі становить 25 Вт/(м²·°C), використовують 50 Вт/(м²·°C) [2]. На цьому ж етапі за формулами (6)–(8) визначають співвідношення (різницю) між значеннями необхідної мінімальної товщини системи вогнезахисту сталевих конструкцій конкретної торгової марки за різними номінальними температурними режимами пожежі.

$$\delta_{d,HC} = 100(d_{p,min,HC} - d_{p,min})/d_{p,min} ; \quad (6)$$

$$\delta_{d,ef} = 100(d_{p,min,ef} - d_{p,min})/d_{p,min} ; \quad (7)$$

$$\delta_{d,HC,ef} = 100(d_{p,min,HC} - d_{p,min,ef})/d_{p,min,ef} , \quad (8)$$

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

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

$\delta_{d,HC,ef}$ – різниця між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисту, отриманими за температурного режиму вуглеводневої і зовнішньої пожежі, %;

$d_{p,min,HC}$ і $d_{p,min,ef}$ – значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту, отримані за температурного режиму вуглеводневої і зовнішньої пожежі, мм;

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

Потрібно зазначити те, що в запропонованому методі визначення співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини системи вогнезахисту сталевих конструкцій конкретної торгової марки за різними номінальними температурними режимами пожежі застосовано низку процедур. Деякі з них є стандартизованими, зокрема це процедури вибирання зразків конструкцій і проведення їхнього випробування, коригування експериментально отриманих проміжків часу до досягнення проєктних температур з урахуванням відмінностей у значеннях коефіцієнта поперечного перерізу і товщини вогнезахисту навантаженої конструкція та короткої конструкції для порівняння, коригування проміжків часу для коротких конструкцій з урахуванням показників щодо «здатності до зчеплення», а також вибирання діапазону і параметрів сталевих конструкцій для визначення значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисту.

Водночас в цьому методі застосовано нестандартизовані процедури коригування проміжків часу для навантажених конструкцій і коротких конструкцій для порівняння, нагрівання яких здійснювали під час різних випробувань, що призвело до відмінностей у фактичних температурних режимах у печі й початковій температурі зразків під час цих випробувань. Як показують результати дослідження, наведені в роботі [18], відмінності між фактичними температурними режимами у печі під час випробувань сталевих конструкцій з одношаровою системою вогнезахисту можуть призводити до значної різниці (до 15,2 %) між проміжками часу до досягнення проєктної температури 500 °С. Відмінності між початковою температурою зразків таких же конструкцій під час випробувань, як показують результати дослідження, подані в роботі [19], можуть призводити до різниці між проміжками часу до досягнення проєктної температури цих зразків до 5,4 %. Саме такі значні величини можливої різниці між проміжками часу обумовили необхідність застосування в запропонованому методі процедур коригування, наведених в роботах [18–20].

Іншими нестандартизованими процедурами, застосованими в запропонованому методі, є розрахункові процедури визначення теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу і необхідної мінімальної товщини

вогнезахисту, які засновано на положеннях, наведених в ДСТУ Б В.1.1-17 [14], EN 13381-4 [5], EN 13381-8 [6] і роботах [22; 23]. За цими процедурами визначення зазначених показників здійснюють шляхом розв'язання оберненої і прямої задач теплопровідності в постановці, наведеній в роботах [22; 23]. Вибір саме таких процедур обумовлено їх підвищеною точністю порівняно з іншими процедурами, поданими в ДСТУ Б В.1.1-17 [14], EN 13381-4 [5], EN 13381-8 [6], що показано зокрема в роботах [13; 22; 23].

Результати, отримані в рамках даного дослідження, можуть вважатися за доцільні з практичної точки зору, тому що вони дозволяють обґрунтовано підходити до визначення співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини системи вогнезахисту сталевих конструкцій конкретної торгової марки за різними номінальними температурними режимами пожежі. З теоретичної точки зору вони дозволяють стверджувати про визначеність метода оцінювання зазначеного співвідношення для одношарових систем вогнезахисту конкретних торгових марок, які містять пасивні або реактивні матеріали. Однак неможливо не зазначити, що запропонований метод стосується тільки одношарових систем вогнезахисту сталевих конструкцій і визначення теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу здійснюють тільки за умов впливу стандартного температурного режиму. Водночас неможна виключити можливість отримання інших даних щодо теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу у разі впливу інших номінальних температурних режимів пожежі, зокрема вуглеводневої. Під час вуглеводневої пожежі інтенсивність теплового впливу на систему вогнезахисту і на конструкцію в цілому більша ніж для пожежі за стандартного температурного режиму [2; 8; 15]. Це збільшення інтенсивності теплового впливу може призвести до погіршення показників щодо «здатності до зчеплення» і теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, і як наслідок цього – до наявності відмінностей в результатах, отриманих за запропонованим методом, стосовно визначення співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини системи вогнезахисту сталевих конструкцій конкретної торгової марки за різними номінальними температурними режимами пожежі. Така невизначеність накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися, як недоліки даного дослідження. Неможливість зняти названі обмеження в рамках даного дослідження породжує потенційно цікавий напрям подальших досліджень. Вони, зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення впливу номінальних температурних режимів пожежі на показники щодо «здатності до зчеплення» і теплофізичні властивості пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів, які застосовують в системах вогнезахисту сталевих конструкцій.

Висновки. За результатами проведеного дослідження встановлено наступне.

1. Визначено метод оцінювання співвідношення між значеннями необхідної мінімальної товщини системи вогнезахисту сталевих конструкцій конкретної торгової марки за різними номінальними температурними режимами пожежі, сутність якого полягає у проведенні випробування за стандартного температурного режиму набору навантажених і ненавантажених конструкцій, визначенні за отриманими експериментальними даними теплофізичних властивостей застосовного вогнезахисного матеріалу, розрахунку за отриманими даними щодо цих властивостей необхідної мінімальної товщини вогнезахисту за різними номінальними температурними режимами пожежі й співвідношення між цими товщинами.

2. Визначено складові цього методу і його процедури, придатні для отримання достовірних результатів щодо зазначеного співвідношення товщини для одношарових пасивних і реактивних систем вогнезахисту сталевих конструкцій. Стандартизованими процедурами, застосовними в цьому методі, є процедури вибирання і проведення випробування зразків конструкцій, коригування проміжків часу до досягнення проєктних температур через відмінність у параметрах зразків для випробування і з урахуванням показників щодо «здатності до зчеплення», а також вибирання діапазону і параметрів сталевих конструкцій для визначення значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисту. Обгрунтовано вибір і застосування в методі нестандартизованих процедур коригування проміжків часу для навантажених конструкцій і коротких конструкцій для порівняння, нагрівання яких здійснювали під час різних випробувань, що призвело до відмінностей у фактичних температурних режимах у печі й початковій температурі зразків під час цих випробувань, а також процедур визначення теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу і розрахунку необхідної мінімальної товщини вогнезахисту.

3. Визначено напрями подальших досліджень, які орієнтовані на виявлення впливу теплових параметрів різних номінальних температурних режимів пожежі на показники щодо «здатності до зчеплення» і теплофізичні властивості вогнезахисних матеріалів, які застосовують в пасивних і реактивних системах вогнезахисту сталевих конструкцій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 CEN. 79 p.

2. 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.

3. EN 1365-3:1999 Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 3: Beams. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999. CEN. 14 p.

4. EN 1365-4:1999 Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 4: Columns. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999. CEN. 11 p.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. EN 1363-2:1999 Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999. CEN. 16 p.

9. Новак С., Добростан О., Пустовий М. Вплив температурного режиму пожежі на проміжок часу збереженості вогнестійкості сталевих конструкцій.

Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2023. № 1 (15). С. 18–31.

10. Новак С., Добростан О., Пустовий М. Вплив температурного режиму пожежі на необхідну мінімальну товщину вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека.* 2022. № 2 (14). С. 5–20.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. ДСТУ Б В.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ) Захист від пожежі. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності. Київ: *Мінрегіонбуд України*, 2008. 65 с.

15. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ: *Мінрегіон України*, 2016. 111 с.

16. EN 1363-1:2020 Fire resistance tests – Part 1: General Requirements. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre: rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 54 p.

17. EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. European committee for standardization. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 91 p.

18. Новак С., Новак М., Пустовий М. Вплив відхилення температури в печі від номінального режиму на результати випробування сталевих конструкцій на вогнестійкість. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека.* 2023. № 2 (16). С. 88–104.

19. Новак С., Добростан О., Пустовий М. Визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості несучих сталевих конструкцій з різною початковою температурою. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека.* 2023. № 2 (16). С. 4–21.

20. Новак С., Добростан О., Пустовий М., Новак М. Коригування проміжку часу до досягнення критичної температури для випробних зразків захищених сталевих конструкцій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека.* 2024. № 1 (17). С. 71–84.

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

22. Новак С., Дріжд В., Добростан О., Новак М. Вплив теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на тепловий стан сталевих колон за стандартного температурного режиму. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека.* 2022. № 1(13). С. 88–110.

REFERENCES

1. EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. CEN-CENELEC Management Centre: Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 CEN. 79 p. [in English].
2. 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].
3. EN 1365-3:1999 Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 3: Beams. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999. CEN. 14 p. [in English].
4. EN 1365-4:1999 Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 4: Columns. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999. CEN. 11 p. [in English].
5. EN 13381-4:2013 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 4: Applied passive protection to steel members. European committee for standardization. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013. CEN. 83 p. [in English].
6. EN 13381-8:2013 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 8: Applied reactive protection to steel members. European committee for standardization. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013. CEN. 80 p. [in English].
7. EN 1993-1-2:2005 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. European committee for standardization. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p. [in English].
8. EN 1363-2:1999 Fire resistance tests – Part 2: Alternative and additional procedures. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 1999. CEN. 16 p. [in English].
9. Novak S., Dobrostan O., Pustovyi M. Vplyv temperaturnoho rezhymu pozhezhi na promizhok chasu zberzhenosti vohnestiikosti stalevykh konstruktsii. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2023. № 1 (15). S. 18–31 [in Ukrainian].
10. Novak S., Dobrostan O., Pustovyi M. Vplyv temperaturnoho rezhymu pozhezhi na neobkhdnu minimalnu tovshchynu vohnezakhysnykh pokryttiv dlia stalevykh konstruktsii. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2022. № 2 (14). S. 5–20 [in Ukrainian].
11. Kovalov A., Zobenko N. Metodyka poperednoi otsinky vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttiv dlia stalevykh konstruktsii v umovakh temperaturnoho rezhymu vuhlevodnevoi pozhezhi. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2016. № 1 (1). S. 59–65 [in Ukrainian].
12. Golovanov V., Kryuchkov G. Otsenka ognestoikosti stalnykh konstruktsii pri normiruemykh temperaturnykh rezhimakh pozhara. *Pozhari i chrezvichainie situatsii: predotvrashchenie i likvidatsiya*. 2021. № 3. S. 52–60 [in Russian].
13. Krukovskij P., Novak S., Poklonskij V., Eremenko S., Frolov G. Otsenka ognestojkosti metallicheskich stroitel'nykh konstrukcij i ognезashhitnoj sposobnosti pokry'tij (raschetno-e'ksperimental'ny'j podkhod): kollektivnaya monografiya. Kiev: Izdatel'stvo TOV "Franko Pak", 2021. 148 s. [in Russian].
14. DSTU B V.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ) Zakhyst vid pozhezhi. Vohnezakhysni pokryttia dlia budivelnykh nesuchykh metalevykh konstruktsii. Metod

vyznachennia vohnezakhysnoi zdatnosti. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2008. 65 s. [in Ukrainian].

15. DSTU-N B V.2.6-211:2016. Proektuvannia stalevykh konstruksii. Rozrakhunok konstruksii na vohnestiikist. Kyiv: Minrehion Ukrainy, 2016. 111 s. [in Ukrainian].

16. EN 1363-1:2020 Fire resistance tests – Part 1: General Requirements. European committee for standardization. CEN-CENELEC Management Centre: rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2020 CEN. 54 p. [in English].

17. EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. European committee for standardization. Central Secretariat: rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 91 p. [in English].

18. Novak S., Novak M., Pustovyi M. Vplyv vidkhylyu temperatury v pechi vid nominalnoho rezhymu na rezultaty vyprobuvannia stalevykh konstruksii na vohnestiikist. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2023. № 2 (16). S. 88–105 [in Ukrainian].

19. Novak S., Dobrostan O., Pustovyi M. Vyznachennia promizhku chasu zberezhenosti vohnestiikosti nesuchykh stalevykh konstruksii z riznoiu pochatkovoju temperaturoju. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2023. № 2 (16). S. 4–21 [in Ukrainian].

20. Novak S., Dobrostan O., Pustovyi M., Novak M. Koryhuvannia promizhku chasu do dosiahnennia krytychnoi temperatury dlia vyprobnykh zrazkiv zakhyshchenykh stalevykh konstruksii. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2024. № 1 (17). S. 71–84 [in Ukrainian].

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

22. Novak S., Dridzh V., Dobrostan O., Novak M. Vplyv teplofizychnykh vlastyvostei vohnezakhysnykh materialiv na teplovyi stan stalevykh kolon za standartnoho temperaturnoho rezhymu. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka. 2022. № 1 (13). S. 88–110 [in Ukrainian].

Maksym PUSTOVYI¹ (ORCID: 0000-0003-1434-4296)

Igor MALADYKA¹, PhD in technical sciences, docent (ORCID: 0000-0001-8784-2814)

Serhii NOVAK², PhD in technical sciences, Senior Researcher
(ORCID: 0000-0001-7087-318X)

¹*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes
of National University of Civil Protection of Ukraine*

²*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection*

ESTIMATION OF THE RATIO OF THE REQUIRED MINIMUM FIRE PROTECTION THICKNESS OF STEEL STRUCTURES UNDER DIFFERENT NOMINAL FIRE TEMPERATURE-TIME CURVE

Given the lack of certainty and practical significance of the data on the relationship between the required minimum thickness of fire protection systems for steel structures under different nominal fire temperature-time curve, research aimed at further improving and developing methods for assessing this thickness at different levels of thermal exposure, reflecting different fire scenarios, as well as methods for

determining this relationship, is currently relevant. The purpose of the study was to substantiate a method for determining this ratio, suitable for obtaining reliable results for the evaluation of passive and reactive fire protection systems for steel structures. To achieve this goal, the task was set to substantiate the components of this method and its procedures.

The essence of the method proposed in this paper is to test a set of loaded and unloaded structures at a standard temperature-time curve, determine the thermal properties of the fire protection material used, calculate the required minimum fire protection thickness for different nominal temperature-time curve and the ratio between these thicknesses based on the data obtained on these properties. This method employs a number of procedures, some of which are standardized and some of which are not. The standardized procedures include procedures for selecting and testing structural specimens, adjusting the time intervals until design temperatures are reached due to differences in test specimen parameters and "adhesion" values, and selecting the range and parameters of steel structures to determine the required minimum fire protection thickness. Non-standardized procedures are used to adjust the time intervals for loaded structures and short structures for comparison, which were heated during different tests, as well as procedures for determining the thermal properties of the fire protection material and calculating the required minimum thickness of fire protection. The rationale for using these procedures in the proposed method is given.

Key words: *fire protection material, fire protection thickness, fire protection system, steel structure, temperature-time curve, thermal properties*