



# НАУКОВИЙ ВІСНИК: Цивільний захист та пожежна безпека

## № 2 (16), 2023

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2518-1777

### Редакційна колегія:

головний редактор –  
голова редколегії  
д-р техн. наук

**Пруський А. В.**

заступник  
головного редактора  
канд. техн. наук  
відповідальний секретар  
канд. техн. наук

**Поздєєв С. В.**

**Огурцов С. Ю.**

д-р техн. наук  
д-р техн. наук  
д-р техн. наук  
д-р техн. наук  
д-р техн. наук  
д-р техн. наук  
д-р техн. наук  
канд. техн. наук  
канд. техн. наук  
канд. техн. наук  
канд. техн. наук  
канд. техн. наук  
канд. техн. наук  
канд. техн. наук  
канд. техн. наук  
канд. хім. наук  
PhDEng.  
PhDEng.

**Тютюнник В. В.**  
**Цапко Ю. В.**  
**Ніжник В. В.**  
**Єременко С. А.**  
**Жартовський С. В.**  
**Чумаченко С. М.**  
**Яковчук Р. С.**  
**Коваленко В. В.**  
**Лоїк В. Б.**  
**Лавренюк О. І.**  
**Новак С. В.**  
**Пазен О. Ю.**  
**Нуязін О. М.**  
**Пасняк І. В.**  
**Сізіков О. О.**  
**Ліхнівський Р. В.**  
**Врублевський Д.**  
**Самберг А.**

Літературні  
редактори:

**Помазанова Т. І.**  
(укр. мова)  
**Івашина Н. О.**  
(англ. мова)

Випусковий редактор

**Борисова А. С.**

### Адреса редакції:

04074, м. Київ, вул. Вишгородська, 21

#### Телефони:

(+380) (44) 430-02-85

<https://nvcz.undicz.org.ua>

e-mail: niv1966@ukr.net

Заснований у 2016 році  
Виходить 2 рази на рік

Засновник

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (ІДУ НД ЦЗ)

Видавець

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (ІДУ НД ЦЗ)

Журнал зареєстровано Міністерством юстиції  
України Свідоцтво від 20.07.2020 серія КВ  
№ 24507-14447 ПР

Журнал включено до категорії «Б» Переліку  
наукових фахових видань України в галузі  
технічних наук за спеціальностями:

261 «Пожежна безпека»

263 «Цивільний захист»

Наказ Міністерства освіти і науки України від  
02.07.2020 № 886

У разі передрукування матеріалів письмовий  
дозвіл ІДУ НД ЦЗ є обов'язковим

Рекомендовано до видання рішенням

Вченої ради ІДУ НД ЦЗ

Протокол від 01.12.2023 № 10

Ідентифікатор випуску DOI:

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2>

Підписано до друку 01.12.2023

Формат 60 × 84/8

Наклад 50 прим.

УДК 614.841

## ВАЛІДАЦІЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПОКАЗНИКІВ СИСТЕМ ВОГНЕЗАХИСТУ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.113-122>

Новак М. С. \*, ORCID iD 0000-0002-5888-5812  
Харкянєн О. В., ORCID iD 0000-0003-4774-9222  
\*E-mail: novak.mikhailo.work@gmail.com

*Національний університет харчових технологій, Україна*

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 29.09.2023*

*Пройшла рецензування: 14.10.2023*

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

валідація, валідаційний експеримент, вогнестійкість, математична модель, система вогнезахисту, сталева конструкція, теплові показники.

### АНОТАЦІЯ

Надано процедуру валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій, засновану на проведенні натурного (валідаційного) експерименту, яка забезпечує автоматизацію процесу валідації. Ця процедура містить етапи експериментального визначення температури зразків сталевих конструкцій (балок, колон завдовжки 1,0 м), оснащених певною системою вогнезахисту, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму, розрахунку теплових показників за методикою, наведеною в стандартах EN 13381-4 і EN 13381-8, та за методикою, яку засновано на розв'язанні оберненої задачі теплопровідності й задачі оптимізації та порівняння розрахункових і дійсних значень визначальних показників. Методика проведення валідаційного експерименту, регламентована в процедурі, відповідає наведеній в зазначених стандартах, за винятком того, що в ній не застосовують навантажені зразки (балки чи колони), призначені для оцінювання здатності системи вогнезахисту до зчеплення. Застосована математична модель для визначення розрахункових значень коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу і необхідної мінімальної товщини вогнезахисту відповідає наведеній в зазначених стандартах. У математичній моделі, яку використовують в процедурі валідації для визначення дійсних (умовно точних) значень коефіцієнта теплопровідності та необхідної мінімальної товщини, на обігрівній поверхні системи вогнезахисту задають граничні умови складного конвективно-радіаційного теплообміну (коефіцієнти тепловіддачі і теплового випромінювання, а також температуру в печі). Це її відрізняє від математичної моделі, наведеній в зазначених стандартах, в якій на цій поверхні задають значення температури, котре дорівнює температурі в печі, і не враховано теплообмін між піччю і системою вогнезахисту. З'ясовано, що для забезпечення автоматизації процесу валідації за зазначеною процедурою необхідно розробити та впровадити інтелектуальну систему керування температурним режимом у печі, а також програмний продукт, який забезпечує автоматизацію процесу введення та збереження вхідних і вихідних даних, необхідних для реалізації процедури валідації, а також розв'язання оберненої задачі теплопровідності й задачі оптимізації.

**Постановка проблеми.** Системи вогнезахисту застосовують для підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій, виготовлених із різних матеріалів. Ці системи складаються з

пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів, до яких належать реактивні вогнезахисні покриття, штукатурки, плити, панелі та мати. Вимоги до цих вогнезахисних матеріалів регламентовано

в Європейських оцінювальних документах [1–3]. В Європейських стандартах серії EN 13381 наведено методи визначення теплових показників систем вогнезахисту, призначених для будівельних конструкцій з бетону, сталі, каменю і деревини. Зокрема, в стандартах EN 13381-4 [4] і EN 13381-8 [5] такі методи наведено для систем вогнезахисту з пасивних і реактивних матеріалів, призначених для несучих сталевих конструкцій без огорожувальної функції (балок і колон). За цими методами [4–5] експериментально визначають проміжки часу до досягнення критичної температури (яка становить від 350 °C до 700 °C) на металевій поверхні зразків цих конструкцій (балок і колон довжиною від 1,0 м до 4,0 м) в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму. За отриманими експериментальними даними, із застосуванням математичної моделі, яка містить рівняння теплопровідності та умови однозначності, визначають теплофізичні властивості й значення мінімальної товщини певної системи вогнезахисту, необхідні для забезпечення нормованих проміжків часу збереженості вогнестійкості суцільних і порожнистих сталевих конструкцій. Надалі ці результати використовують для проектування вогнестійких сталевих конструкцій відповідно до вимог, наведених у Єврокодi 3 [6].

У стандартах EN 13381-4 [4] і EN 13381-8 [5] надано детальний опис процедур щодо створення експериментальних зразків, проведення випробувань і оброблення отриманих експериментальних даних, однак не надано інформацію про ступінь відповідності одержуваних результатів дійсним значенням теплових показників систем вогнезахисту. Такий ступінь відповідності встановлюють під час валідації методів, основною метою якої є підтвердження того, що метод «придатний для конкретного застосування» [7–8].

Для валідації методів, наведених в EN 13381-4 [4] і EN 13381-8 [5], в роботі [9] запропоновано процедуру, яка ґрунтується на проведенні обчислювальних експериментів на основі математичного моделювання теплового стану сталеві конструкції в умовах

вогневого впливу за стандартного температурного режиму. В ній реалізовано автоматизацію процесу введення і збереженості вхідних і вихідних даних, які використовують в комп'ютерних програмах цієї процедури, що дає змогу уникнути багаторазового втручання оператора. Крім цього, у цій процедурі передбачено проведення валідації для змінної кількості експериментальних зразків. Це є її певними перевагами, однак вона має і певні недоліки. Ця процедура заснована тільки на проведенні обчислювальних експериментів і не передбачає використання даних фізичних (натурних) експериментів, які могли б забезпечити отримання наближених до дійсних даних щодо теплофізичних властивостей, застосованих у системах вогнезахисту матеріалів. Не є вирішеним також питання щодо повної автоматизації процесу валідації. Це накладає певні обмеження на використання наведеної в роботі [9] процедури валідації.

Ураховуючи наведене і зважаючи на доцільність підвищення точності визначення даних про ступінь відповідності результатів випробувань дійсним значенням визначальних показників, актуальним слід вважати дослідження, спрямоване на подальше удосконалення та розвиток технології валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Числові прогнози визначальних показників, виміряних у фізичних системах, ґрунтуються на використанні математичних моделей, які мають бути валідовані. Валідація моделі зазвичай передбачає порівняння експериментальних даних (визначальних показників системи) і прогнозів моделі, отриманих за конкретним сценарієм валідації. Проектування цього валідаційного експерименту має безпосередньо стосуватися моделі, тобто передбачати визначальний показник за сценарієм прогнозування. Щоб оцінити потенціал моделі для прогнозування певного визначального показника вона має бути валідована. Інакше кажучи, похибка між моделлю та реальністю, яку вона має

описати, повинна бути точно кількісно визначена щодо цього визначального показника [10].

Під час процесу валідації передбачено порівняння результатів моделі з експериментальними даними, отриманими під час випробування досліджуваної системи. Останнім часом у літературі запропоновано декілька процедур валідації моделі. Наприклад, у роботі [11] здійснено детальний огляд процесів верифікації та валідації, тоді як у [12] – ретельне обговорення цих двох процесів із зосередженням на розгляді як алеаторної, так і епістемічної невизначеності. В оглядовій статті [13] ґрунтовно проаналізовано масштаби та недоліки підходів до валідації. Стаття [14] містить огляд літератури, присвяченої проблемам невизначеності, калібрування параметрів і валідації моделі.

Валідація моделі стає все більш актуальною та першорядною в галузі обчислювальних наук та техніки через складність моделей, які зараз використовуються, як і попит на прогнозні та кількісні результати. Однак критичним аспектом залишається вибір відповідних валідаційних експериментів, оскільки вони надають експериментальні дані, з якими порівнюється прогноз моделі, і таким чином безпосередньо впливають на думку про те, чи вважається модель дійсною (правильною) чи ні. Це питання стає ще більш важливим, коли кількість валідаційних експериментів або обсяг даних обмежені. В роботі [10] розглянуто два конкретні питання, що виникають під час проектування валідаційних експериментів. Перше з них полягає у визначенні відповідного сценарію валідації, якщо сценарій прогнозу неможливо виконати в контрольованому середовищі. Друге питання стосується вибору спостережень, коли кількісну оцінку визначального показника не може бути легко проведено. В роботі [11] розглянуто питання про унікальність характеристик валідаційних експериментів. Зазначено, що валідаційний експеримент – це більше, ніж традиційний високоякісний експеримент. Він має надавати інформацію, яка зазвичай недоступна у традиційних експериментах,

і бути оптимізованим для нетрадиційних клієнтів, таких як розробники математичних моделей і аналітики моделювання.

Загальні вимоги щодо верифікації та валідації аналітичних моделей, алгебраїчних співвідношень, а також складних числових моделей, що використовуються як розрахункові методи для інжинірингу пожежної безпеки, надано в міжнародному стандарті ISO 16730-1 [8]. Технічний звіт ISO 16730-4 [15] містить приклад застосування процедур верифікації та валідації, наведених у ISO 16730-1 [8], для моделі вогнестійкості стінової конструкції. Ця модель поєднує підмодель теплопровідності та структурну підмодель. Підмодель теплопровідності прогнозує профіль температури всередині дерев'яної стіни і проміжок часу до настання граничного стану за ознакою втрати теплоізолювальної здатності. Структурна підмодель, заснована на пружному навантаженні на вигин, використовує температурний профіль для розрахунку прогину конструкції та проміжку часу до настання її граничної деформації.

У роботі [16] наведено процедуру і результати валідації скінченно-елементної моделі вогнестійкості залізобетонної конструкції, що піддають вогневному впливу за номінального температурного режиму. Ця процедура заснована на порівнянні експериментальних даних із прогнозними значеннями визначального показника, отриманими за моделлю.

У роботі [9] надано процедуру валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій, яку засновано на проведенні обчислювального експерименту. Згідно з цією процедурою здійснюють порівняння даних щодо теплових показників системи вогнезахисту, отриманих за допомогою обчислювального експерименту, і за моделлю, наведеній в стандартах EN 13381-4 [4] і EN 13381-8 [5]. У цій процедурі вхідними даними для валідації слугують результати розв'язання прямих задач теплопровідності щодо теплового стану сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму. Вона має певні

недоліки, зокрема, в ній не передбачено проведення натурного (валідаційного) експерименту і немає повної автоматизації процесу валідації.

З огляду на зазначене є підстави вважати, що недостатня досконалість процесу валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій зумовлює проведення досліджень в цьому напрямі.

**Формулювання цілей дослідження.** За мету дослідження ставилось встановлення процедури валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій, заснованої на проведенні натурного (валідаційного) експерименту, яка забезпечує автоматизацію процесу валідації.

Для її досягнення поставлено завдання щодо визначення етапів і експериментальних та розрахункових складових цієї процедури, а також вимог до програмного забезпечення, необхідного для її реалізації.

**Методи дослідження.** Застосовано метод дослідження, складовими якого є аналізування, синтез, порівняння, узагальнення і систематизація.

**Виклад основного матеріалу.** За результатами розгляду джерел інформації, враховуючи положення, надані в стандартах EN 13381-4 [4], EN 13381-8 [5], ISO 16730-1 [8], запропоновано процедуру валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій, яку схематично показано на рис. 1.

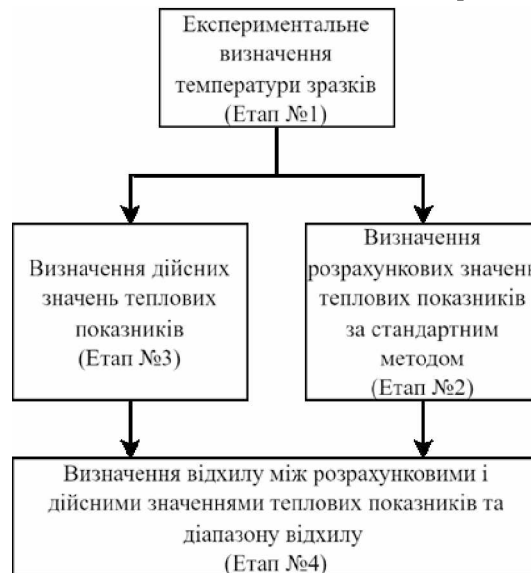


Рисунок 1 – Процедура валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій

На першому етапі валідації експериментально визначають температуру на металевій поверхні низки експериментальних зразків (балок, колон завдовжки 1,0 м), оснащених певною системою вогнезахисту, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму. Кількість цих зразків є змінною і залежить від передбачуваної сфери застосування результатів визначення теплових показників системи вогнезахисту (типу системи вогнезахисту (профільована чи коробчаста), типу конструкції (балка чи колона), профілю сталеві конструкції

(суцільна чи порожниста)) і номера набору експериментальних зразків, котрі надано в [4–5], які задають під час валідації. Для сталевих конструкцій з пасивною системою вогнезахисту ця кількість може становити від 4 до 24 [4], а з реактивною – від 6 до 26 [5]. Параметри цих зразків (коефіцієнт поперечного перерізу конструкції і товщина вогнезахисту) є різними. Зразки препарують термопарами, встановлюють у вогневу піч без механічного навантаження і піддають вогневому впливу за стандартного температурного режиму. Під час експерименту із використанням

аналого-цифрових перетворювачів вимірюють та регулюють температуру в печі, вимірюють температуру зразків і передають отримані температурні дані до комп'ютера. Регулювання температури в печі здійснюють таким чином, щоб середня температура в печі  $\theta_{furn}$  (далі – температура в печі), яку визначають за показами пластинчастих термометрів, була максимально наближеною до номінального значення  $\theta_s$  (формула (1)) і відхил  $d_e$  (формула (2)) площі під кривою температури в печі  $\theta_{furn}(t)$  від площі під кривою номінального температурного режиму  $\theta_s(t)$  не перевищував таких значень [17]:

- 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  $t > 60$ .

$$\theta_s = 3451g(8t + 1) + 20; \quad (1)$$

$$d_e = 100(A_{furn} - A_s)/A_s \quad (2)$$

де  $\theta_s$  – номінальна температура в печі, яка відповідає проміжку часу  $t$ , °C;

$t$  – проміжок часу, що відрховується від початку вогневого впливу (від запалювання пальників у печі), хв;

$d_e$  – відхил площі під кривою температури в печі  $\theta_{furn}(t)$  від площі під кривою номінального температурного режиму  $\theta_s(t)$ , %;

$A_{furn}$  – площа під кривою температури в печі  $\theta_{furn}(t)$ , °C·хв;

$A_s$  – площа під кривою номінального температурного режиму  $\theta_s(t)$ , °C·хв.

Слід зазначити, що значення відхилу  $d_e$  для проміжку часу  $t$  від 0 до 5 хв не нормовано через значну теплову інерційність пластинчастих термометрів, які використовують для вимірювання температури в печі [18].

Отримані експериментальні значення температури зразків ( $\theta_{a,1}, \theta_{a,2}, \dots, \theta_{a,n}$ , де  $n$  – кількість зразків) використовують для розрахунку теплових показників системи вогнезахисту за методом, встановленим у стандартах EN 13381-4 [4], EN 13381-8 [5], (етап № 2). Відповідно до цього методу за даними щодо температури зразків розраховують коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_{p,cal}$  вогнезахисного матеріалу, який

застосовано в системі вогнезахисту, і значення необхідної мінімальної товщини  $d_{p,cal}$  вогнезахисту. Під час цих розрахунків використовують одномірне скінченно-різницеve рівняння теплопровідності і розглядають два альтернативні варіанти, в одному з них коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_{p,cal}$  задають змінним (залежним від температури), в іншому – незалежним від температури. Відповідно до стандартів EN 13381-4 [4], EN 13381-8 [5] застосовність отриманих значень коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{p,cal}$  до розрахунку товщини  $d_{p,cal}$  перевіряють за такими критеріями прийнятності:

- для кожного зразка жодне розрахункове за рівнянням теплопровідності значення проміжку часу  $t_{cal}$  до досягнення критичної температури не повинно перевищувати відповідного експериментального значення  $t_{exp}$  більше ніж на 15%;

- для кожного зразка середнє значення усіх відсоткових відмінностей  $t_{cal}$  від  $t_{exp}$  має бути меншим за нуль;

- більшим за нуль мають бути не більше ніж 30% окремих значень усіх відсоткових відмінностей  $t_{cal}$  від  $t_{exp}$ .

Однак слід зазначити, що застосування цих критеріїв під час валідації призведе до наявності систематичної складової відхилу між розрахунковим значенням коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{p,cal}$  і дійсним його значенням  $\lambda_{p,ac}$ , а також до наявності систематичної складової відхилу розрахункової товщини  $d_{p,cal}$  від дійсної товщини  $d_{p,ac}$  (ці відхили будуть більше нуля [19]). Отже, під час валідації для перевіряння застосовності отриманих значень коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{p,cal}$  до розрахунку товщини  $d_{p,cal}$  взято за критерій мінімальну величину середнього квадратичного відхилу між розрахунковими  $t_{cal}$  і експериментальними  $t_{exp}$  проміжками часу до досягнення критичної температури, визначеними для усіх зразків.

Алгоритм розрахунків за другим етапом описано в [9; 20]. Результатами розрахунку теплових показників системи

вогнезахисту є набір даних щодо величини необхідної мінімальної товщини вогнезахисту  $d_{p,cal}$  для різних нормованих значень коефіцієнта поперечного перерізу  $A_p/V$  (від  $40 \text{ м}^{-1}$  до  $400 \text{ м}^{-1}$ , з кроком  $10 \text{ м}^{-1}$ ), критичної температури  $\theta_{cr}$  (від  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ , з кроком  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) і проміжку часу  $t_{fr,requ}$  збереженості вогнестійкості сталевій конструкції (від 15 хв до 240 хв).

На третьому етапі за отриманими експериментальними даними щодо температури зразків визначають дійсні (умовно точні) теплові показники системи вогнезахисту. Під час цих розрахунків використовують математичну модель, яка містить одномірне нестационарне нелінійне рівняння теплопровідності з граничними умовами конвективно-радіаційного теплообміну [9]. Із залученням цієї моделі здійснюють визначення залежного від температури коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{p,ac}$  вогнезахисного матеріалу, який застосовано в системі вогнезахисту, і значення необхідної мінімальної товщини  $d_{p,ac}$  вогнезахисту. Коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_{p,ac}$  визначають через розв'язання оберненої задачі теплопровідності за екстремальним методом, опис якого надано в [21]. Результатом розв'язання цієї оберненої задачі є значення коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{p,ac}$ , за яких середній квадратичний відхил між розрахунковими і експериментальними температурами, визначеними для усіх зразків, має мінімальну величину. Значення необхідної мінімальної товщини  $d_{p,ac}$  визначають через розв'язання задачі оптимізації за методом, наведеним у [20]. Цей метод

полягає у визначенні товщини  $d_{p,ac}$ , за якої розрахункова температура сталевій конструкції дорівнює критичній температурі  $\theta_{cr}$ . Розрахункову температуру сталевій конструкції визначають через розв'язання прямої задачі теплопровідності. Результатами розрахунку теплових показників системи вогнезахисту, отриманими за цим етапом, є набір даних щодо величини необхідної мінімальної товщини вогнезахисту  $d_{p,ac}$  для тих же нормованих значень коефіцієнта поперечного перерізу  $A_p/V$ , критичної температури  $\theta_{cr}$  і проміжку часу  $t_{fr,requ}$  збереженості вогнестійкості сталевій конструкції, які застосовували на другому етапі.

На четвертому етапі визначають відсотковий відхил  $\delta_d$  розрахункових значень необхідної мінімальної товщини  $d_{p,cal}$  від  $d_{p,ac}$  і наводять його в табличній формі (табл. 1). У цю таблицю надають тільки відхили, розраховані за значеннями необхідної мінімальної товщини  $d_{p,cal}$ , які перебувають в діапазоні товщини експериментальних зразків, а також максимальний відхил, визначений для різних величин коефіцієнта поперечного перерізу  $A_p/V$ . За цієї формою наводять дві таблиці: одну – для варіанта зі змінним коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_{p,cal}$ , другу – для варіанта з незалежним від температури  $\lambda_{p,cal}$ . За наведеними в таблицях даними щодо  $\delta_d$  для кожного з цих варіантів встановлюють мінімальне та максимальне значення відхилу і відповідний його діапазон  $[\delta_{d,min}, \delta_{d,max}]$  (табл. 1).

Таблиця 1 – Форма надання результатів визначення відхилу  $\delta_d$

Критична температура $\theta_{cr}$ , $^\circ\text{C}$	350	400	450	500	550	600	650	700
Нормований проміжок часу збереженості вогнестійкості $t_{fr,requ}$ , хв	Значення відхилу $\delta_d$ , %							
15								
30								
...								
240								
Діапазон відхилу $[\delta_{d,min}, \delta_{d,max}]$								

Щодо запропонованої процедури валідації (рис. 1) слід зазначити таке.

Методика проведення валідаційного експерименту (етап № 1) відповідає наведеній у стандартах EN 13381-4 [4], EN 13381-8 [5], за винятком того, що в ній не застосовують навантажені зразки (балки чи колони) для оцінювання здатності системи вогнезахисту до зчеплення. Це зроблено для отримання більш точних результатів валідації методів визначення коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{p,cal}$  і необхідної мінімальної товщини  $d_{p,cal}$ , які наведено в цих стандартах.

Математична модель, яку застосовано на другому етапі для розрахунків  $\lambda_{p,cal}$  і  $d_{p,cal}$ , відповідає наведеній в стандартах EN 13381-4 [4], EN 13381-8 [5] і є спрощеною. В цій моделі на обігрівній поверхні системи вогнезахисту задано значення температури, яке дорівнює температурі в печі, і не враховано теплообмін між піччю і цією системою. В математичній моделі, яку застосовують на третьому етапі валідації, на цій поверхні задають граничні умови складного конвективно-радіаційного теплообміну (коефіцієнти тепловіддачі і теплового випромінювання, а також температуру в печі) [9], що забезпечує отримання значень коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{p,ac}$  і необхідної мінімальної товщини  $d_{p,ac}$ , найбільш наближених до дійсних.

Крім цього, для автоматизації процесу валідації за процедурою, наведеною на рис. 1, необхідно розробити низку таких заходів.

Для здійснення автоматизованого керування температурним режимом у печі потрібно розробити та впровадити інтелектуальну систему, що придатна виконувати оптимальне регулювання витрат рідкого пального і повітря у пальниках через змінення тиску в їхніх магістралях для наближення температурного режиму в печі до номінального. Для цієї розробки необхідно виконати низку досліджень, зокрема це дослідження, орієнтовані на виявлення впливу щільності теплового потоку від

пальників у печі на покази пластинчастих термометрів і визначення параметрів системи керування для проміжку часу вогневого впливу до 5 хв, для якого не встановлено допустимий відхил фактичного температурного режиму в печі від номінального.

Потрібно створити програмний продукт, який забезпечує автоматизацію процесу введення і збереження вхідних даних, необхідних для реалізації процедури валідації, розв'язання необхідної кількості прямих задач теплопровідності для вирішення оберненої задачі й задачі оптимізації та отримання вихідних даних щодо відсоткового відхилення розрахункових значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисту від дійсних та відповідного його діапазону. Вхідними даними є параметри експериментальних зразків (величини коефіцієнта поперечного перерізу  $((A_p/V)_{min}, \dots, (A_p/V)_{max})$  і товщини вогнезахисту  $(d_{p,exp,1}, d_{p,exp,2}, \dots, d_{p,exp,n})$  та значення критичної температури  $(\theta_{cr,min}, \dots, \theta_{cr,max})$ . Для програмного забезпечення виконання третього етапу валідації є доцільним застосувати прикладну програму FRIEND-2 [21], призначену для розв'язання прямих і обернених задач теплопровідності. В цій програмі впроваджено чисельний метод розв'язання одномірних прямих і обернених задач теплопровідності за неявною кінцево-різницевою схемою апроксимації. В її директоріях розміщені основний файл-вирішувач, вхідні та вихідні файли розв'язання цих задач теплопровідності. Ця програма придатна для розв'язання обернених задач теплопровідності за даними щодо температури декількох експериментальних зразків  $(\theta_{a,1}, \theta_{a,2}, \dots, \theta_{a,n})$  з високою точністю [21]. Розроблюваний програмний продукт, який має здійснювати автоматизацію процесу валідації за процедурою, наведеною на рис. 1, повинен забезпечувати завдання вхідних даних і автономний запуск задач через програму FRIEND-2, а також ітераційний процес розв'язання оберненої

задачі теплопровідності й задачі оптимізації.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** У цьому дослідженні встановлено процедуру валідації методів визначення теплових показників систем вогнезахисту сталевих конструкцій, засновану на проведенні натурального експерименту, яка забезпечує автоматизацію процесу валідації.

Наведено етапи цієї процедури, які містять експериментальне визначення температури низки зразків сталевих конструкцій, оснащених певною системою вогнезахисту, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму, визначення розрахункових і дійсних значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисту та відхилу між ними.

Встановлено, що для забезпечення автоматизації процесу валідації за цією процедурою необхідно розробити та впровадити інтелектуальну систему керування температурним режимом у печі, а також програмний продукт, який забезпечує автоматизацію процесу введення і збереження вхідних і вихідних даних, необхідних для реалізації процедури валідації, а також розв'язання оберненої задачі теплопровідності й задачі оптимізації через використання програми FRIEND-2.

Окреслено напрями подальших досліджень, які орієнтовані на виявлення впливу щільності теплового потоку від пальників у печі на покази пластинчастих термометрів і визначення параметрів системи керування температурним режимом у печі.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EAD 350402-00-1106 Reactive coatings for fire protection of steel elements. EOTA 2017. 32 p.
2. EAD 350140-00-1106 Renderings and rendering kits intended for fire resistant applications. EOTA 2017. 48 p.
3. EAD 350142-00-1106 Fire protective board, slab and mat products and kits. EOTA 2017. 60 p.
4. 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.
5. 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.
6. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–2: General rules – Structural fire design. European committee for standardization. Management Centre : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p.
7. EN ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. European committee for standardization. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2017 CEN. 30 p.
8. ISO 16730-1:2015 Fire safety engineering – Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods – Part 1 : General. CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland. ISO 2015. 42 p.
9. Новак С., Новак М. Розроблення автоматизованої процедури валідації методів розрахунку характеристики вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. № 1(11). С. 3–10.
10. Antonin Paquette-Rufiange, Serge Prudhomme, Marc Laforest. Optimal design of validation experiments for the prediction of quantities of interest. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2023. Vol. 414. P. 116–182.
11. William L. Oberkampf, Timothy G. Trucano. Verification and validation benchmarks. *Nuclear Engineering and Design*. 2008. Vol. 238. P. 716–743.
12. Christopher J. Roy, William L. Oberkampf. A comprehensive framework for verification, validation, and uncertainty quantification in scientific computing. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2011. Vol. 200. P. 2131–2144.
13. Stefan Riedmaier, Benedikt Danquah, Bernhard Schick, Frank Diermeyer, Unified Framework and Survey for Model Verification, Validation and Uncertainty Quantification. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020. Vol. 28. P. 2655–2688.
14. Guesuk Lee, Wongon Kim, Hyunseok Oh, Byeng D. Youn, Nam H. Kim. Review of statistical model calibration and validation – from the perspective of uncertainty structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2019. Vol. 60. P. 1619–1644.
15. ISO/TR 16730-4:2013 Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods – Part 4 : Example of a structural model. CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland. ISO 2013. 15 p.
16. I. Džolev, M. Cvetkovska, V. Radonjanin, D. Ladinović, M. Laban. Modelling approach of structural fire performance. 1st International Symposium Students for Resilient society S-FORCE 2018. Novi Sad, September 28–29. 2018. P. 17–24.
17. 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.
18. Новак С., Добростан О., Абрамов О. Вплив параметрів засобів вимірювання температури в печі на результати випробувань будівельних конструкцій і виробів на вогнестійкість. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(13). С. 4–14.

19. Григор'ян Н., Круковский П., Новак С. Области применения стандартизованных методов определения огнезащитной способности огнезащитных покрытий металлических конструкций : монография. Черкассы: ЧИПБ им. Героев Чернобыля НУГЗ Украины, 2016. 132 с.
20. Новак С., Новак М. Валідація методів розрахунку мінімальної товщини вогнезахисних матеріалів для сталевих конструкцій. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2020. № 2 (10). С. 83–90.
21. 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.

## REFERENCES

1. EAD 350402-00-1106 Reactive coatings for fire protection of steel elements. EOTA 2017. 32 p. [in English].
2. EAD 350140-00-1106 Renderings and rendering kits intended for fire resistant applications. EOTA 2017. 48 p. [in English].
3. EAD 350142-00-1106 Fire protective board, slab and mat products and kits. EOTA 2017. 60 p. [in English].
4. 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].
5. 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].
6. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–2 : General rules – Structural fire design. European committee for standardization. Management Centre : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p. [in English].
7. EN ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. European committee for standardization. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2017 CEN. 30 p. [in English].
8. ISO 16730-1:2015 Fire safety engineering – Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods – Part 1 : General. CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland. ISO 2015. 42 p. [in English].
9. Novak, S., Novak, M. Rozroblennia avtomatyzovanoi protsedury validatsii metodiv rozrakhunku kharakterystyky vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttiv dlia stalevykh konstrukttsii [Development of an automated procedure for validation of methods of calculation of characteristics of fire protective capacity for coatings for steel structures]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2021. № 1(11). S. 3–10. [in Ukrainian].
10. Antonin, Paquette-Rufiange, Serge, Prudhomme, Marc, Laforest. Optimal design of validation experiments for the prediction of quantities of interest. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2023. Vol. 414. P. 116–182. [in English].
11. William L. Oberkampf, Timothy G. Trucano. Verification and validation benchmarks. *Nuclear Engineering and Design*. 2008. Vol. 238. P. 716–743. [in English].
12. Christopher J. Roy, William L. Oberkampf. A comprehensive framework for verification, validation, and uncertainty quantification in scientific computing. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2011. Vol. 200. P. 2131–2144. [in English].
13. Stefan, Riedmaier, Benedikt, Danquah, Bernhard, Schick, Frank, Diermeyer. Unified Framework and Survey for Model Verification, Validation and Uncertainty Quantification. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2020. Vol. 28. P. 2655–2688. [in English].
14. Guesuk, Lee, Wongon, Kim, Hyunseok, Oh, Byeng D., Youn, Nam H., Kim. Review of statistical model calibration and validation – from the perspective of uncertainty structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2019. Vol. 60. P. 1619–1644. [in English].
15. ISO/TR 16730-4:2013 Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods – Part 4: Example of a structural model. CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland. ISO 2013. 15 p. [in English].
16. Džolev, I., Cvetkovska M., Radonjanin, V., Ladinović, Đ., Laban M. Modelling approach of structural fire performance. 1st International Symposium Students for Resilient society S-FORCE 2018. Novi Sad, September 28–29. 2018. P. 17–24. [in English].
17. 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].
18. Novak, S., Dobrostan, O., Abramov, O. Vplyv parametriv zasobiv vymiruvannia temperatury v pechi na rezultaty vyprobuvan budivelnnykh konstrukttsii i vyrobiv na vohnestiikist [Influence of parameters of means of temperature measurement in the furnace on the results of fire resistance tests of building structures and products]. *Naukovyi visnyk : Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2022. № 1(13). S. 4–14. [in Ukrainian].
19. Grigor'yan N., Krukovskij P., Novak S. Oblasti primeneniya standartizirovannykh metodov opredeleniya ognenezashhitnoj sposobnosti ognenezashhitnykh pokryt'ij metallicheskich konstrukcij [Areas of application of standardized methods for determining the fire retardant ability of fire retardant coatings of metal structures]: monografiya. Cherkassy': ChIPB im. Geroev Chernobylya NUGZ Ukrainy'. 2016. 132 s. [in Russian].
20. Novak, S., Novak, M. Validatsiia metodiv rozrakhunku minimalnoi tovshchyny vohnezakhysnykh materialiv dlia stalevykh konstrukttsii [Validation of methods for calculating the minimum thickness of fire-retardant materials for steel structures]. *Naukovyi visnyk : Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2020. № 2(10). S. 83–90. [in Ukrainian].
21. Krukovskij, P., Novak, S., Poklonskij, V., Eremenko, S., Frolov, G. Ocenka ognestojkosti metallicheskich stroitel'nykh konstrukcij i ognenezashhitnoj sposobnosti pokryt'ij (raschetno-e'ksperimental'nyj podkhod) [Evaluation of the fire resistance of metal building structures and the fire retardant ability of coatings (computational and experimental approach)]. Kiev: Franko Pak, 2021. 148 s. [in Russian].

## VALIDATION OF METHODS FOR DETERMINING THERMAL PERFORMANCE OF FIRE PROTECTION SYSTEMS OF STEEL STRUCTURES

*M. Novak, O. Kharkianen*

*The National University of Food Technologies, Ukraine*

---

**KEYWORDS:**

validation,  
validation  
experiment, fire  
resistance,  
mathematical  
model, fire  
protection system,  
steel structure,  
thermal  
performance.

**ANNOTATION**

This article presents the procedure for the validation of methods for determining the thermal performance of fire protection systems of steel structures, based on conducting a full-scale (validation) experiment, which ensures the automation of the validation process. This procedure includes the stages of experimental determination of the temperature of samples of steel structures (beams, columns 1.0 m long), equipped with a certain fire protection system, under the conditions of fire exposure at a standard temperature regime, calculation of thermal performance according to the methodology given in the standards EN 13381-4 and EN 13381-8, and according to the method, which is based on solving the inverse problem of thermal conductivity and the optimization problem, and comparing the calculated and actual values of the determining performance. The method of conducting the validation experiment, regulated in the procedure, corresponds to that given in the specified standards, except that it does not use loaded samples (beams or columns) intended for evaluating the ability of the fire protection system to bond. The applied mathematical model for determining the calculated values of the coefficient of thermal conductivity of the fire protection material and the required minimum thickness of the fire protection corresponds to that given in the specified standards. In the mathematical model, which is used in the validation procedure to determine the valid (conditionally accurate) values of the thermal conductivity coefficient and the required minimum thickness, the boundary conditions of complex convective-radiative heat exchange (coefficients of heat transfer and thermal radiation, as well as the temperature in the furnace) are set on the heating surface of the fire protection system. It was determined that in order to ensure the automation of the validation process according to the specified procedure, it is necessary to develop and implement an intelligent temperature control system in the furnace, as well as a software product that ensures the automation of the input process and the preservation of input and output data necessary for the implementation of the validation procedure, as well as the development solving the inverse heat conduction problem and the optimization problem.