

УДК 614.841.45:389:53.08

## ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОГНЕСТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

С.В. Новак<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ст. наук. співроб., М.С. Новак<sup>2</sup>, О.І. Бедратюк<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Україна

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 22.10.2019

Пройшла рецензування: 04.12.2019

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

будівельна конструкція, валідація, верифікація, вогнезахисний матеріал, вогнестійкість, оцінювання методу

### АНОТАЦІЯ

Наведено результати дослідження, спрямованого на подальше удосконалення і розвитку процедур оцінювання методів визначення характеристик вогнестійкості будівельних конструкцій. Визначено особливості оцінювання методів визначення характеристик вогнестійкості будівельних конструкцій. Запропоновано процедуру валідації експериментально-розрахункових методів, призначених для визначення товщини вогнезахисту будівельних конструкцій, за якої забезпечується їхня вогнестійкість у широкому діапазоні змінювання параметрів цих конструкцій, засновану на проведенні обчислювального експерименту. Встановлено придатність запропонованої процедури валідації шляхом її застосування для експериментально-розрахункового методу, призначеного для визначення товщини вогнезахисних матеріалів для несучих сталевих конструкцій (колон і балок). Визначено напрям подальших досліджень, які орієнтовані на виявлення впливу теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів і напружено-деформованого стану зразків сталевих конструкцій під час випробування на точнісні показники методу, що дозволить визначити більш прийнятні процедури оцінювання методу і оброблення експериментальних даних із підвищеною точністю.

**Вступ.** Відповідно до положень будівельного єврокоду 1 [1] для оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій можуть застосовуватися експериментальні або розрахункові методи. Процеси розроблення та оцінювання цих методів містять у собі визначення їхньої точності й меж застосування, а також тестування. Зокрема, оцінювання розрахункового методу – це процес визначення ступеня, за якого метод розрахунку є точним відображенням реальності з точки зору цілей розрахунку і ступеня точності, за якого реалізація методу розрахунку точно відображає концептуальний опис методу розрахунку, виконаний його розробником, і отримане рішення [2, 3].

Ключовими процесами в оцінюванні методу є його верифікація і валідація. Верифікація і валідація методу – це процедури, які використовують для визначення ступеня відповідності методу реальним процесам з точки зору можливих цілей його застосування (валідація) і ступеня точності реалізації методу (верифікація). Верифікація – це процес визначення правильності реалізації методу. Валідація дозволяє переконатися, що результати відповідають даним, очікуваним в реальності.

Основні положення стосовно оцінювання експериментальних і розрахункових методів визначення вогнестійкості будівельних конструкцій, такі положення не завжди придатні для оцінювання методів для цієї сфери. Зокрема, це стосується методів, призначених для визначення товщини вогнезахисту будівельних конструкцій, за якої забезпечується їхня вогнестійкість.

Зважаючи на зазначене і необхідність розроблення і впровадження методів з визначеними показниками точності й межею застосування, актуальним слід вважати дослідження, спрямовані на подальше удосконалення і розвиток процедур оцінювання методів визначення характеристик вогнестійкості будівельних конструкцій.

### *Аналіз літературних даних та постановка проблеми.*

Валідація експериментальних методів загалом може охоплювати різні процедури, зокрема – відбору та кондиціонування зразків для випробування, обробки отриманих даних. Прийоми, які використовують для валідації цих методів, можуть бути такими [4]:

– калібрування або оцінювання зміщення виміру та прецизійності засобу вимірювальної

техніки з використанням вихідних еталонів або стандартних зразків;

- систематичне оцінювання чинників, що впливають на результат;
- перевірка стійкості методу шляхом зміни регульованих параметрів, наприклад, температури;
- порівняння з результатами, отриманими за іншими валідованими методами;
- міжлабораторні порівняння;
- оцінка невизначеності результатів вимірювань на основі розуміння теоретичних принципів методу та практичного досвіду роботи за методом випробування.

Робочі характеристики валідованих експериментальних методів мають бути сумісними з визначеними вимогами. Ці характеристики можуть містити, наприклад, діапазон вимірювань, точність, невизначеність результатів вимірювання, межу виявлення, межу кількісного визначення, вибірковість методу, лінійність, стійкість до зовнішніх впливів або перехресної чутливості до впливу матриці зразка чи об'єкта випробування [4].

Верифікація експериментальних методів – це підтвердження здатності отримувати достовірні результати, придатні для розв'язання конкретного завдання, по готовому валідованому методу. Під час верифікації необхідно пересвідчитися, що метод реалізується правильно шляхом доведення того, що досягається необхідна результативність [4]. При цьому часто оцінюють повторюваність (збіжність) і відтворюваність отриманих результатів [5, 6]. Стандартизованих окремих процедур щодо верифікації, а також і щодо валідації методів, призначених для експериментального визначення характеристик вогнестійкості будівельних конструкцій, ще не впроваджено.

Стосовно валідації й верифікації методів розрахунку у сфері пожежної безпеки, то вони достатньо детально описані в [2, 3, 7 – 11]. На рис. 1 у загальному схематичному вигляді представлені етапи розроблення комп'ютеризованих моделей (методів) у сфері пожежної безпеки й роль верифікації та валідації у цих процесах [3]. Під час розроблення розрахункових методів концептуальну модель створюють на основі сприйняття (аналізу) явищ реального світу (іноді фізичної системи) у вигляді докладного словесного опису даного процесу (ів), який надалі перетворюють на набір математичних взаємозв'язків (математичну модель або аналітичні формули). Однак на рисунку 1

математичну модель окремо не позначено. Стосовно оцінювання комп'ютеризованих моделей у [3] наведено, що верифікація розглядає взаємозв'язок між концептуальною моделлю і комп'ютеризованою, в той час як валідація розглядає взаємозв'язок між розрахунковою моделлю і реальністю. З цим можна не погодитись, бо верифікація розглядає взаємозв'язок між математичною і комп'ютеризованою моделями.

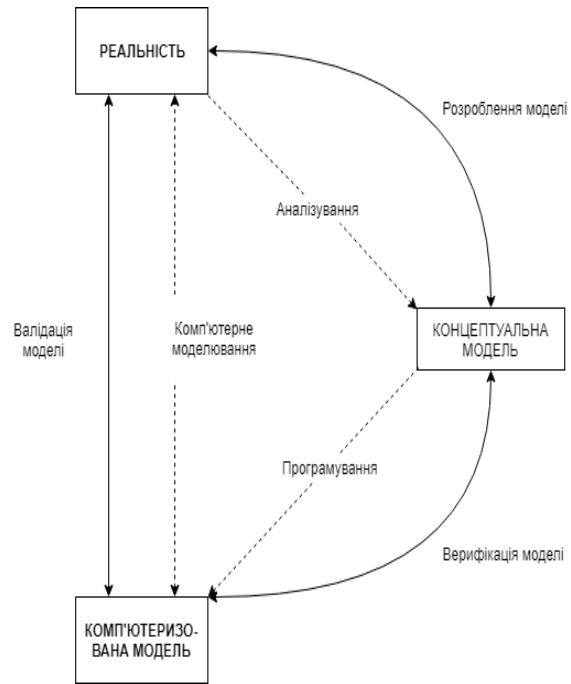


Рисунок 1 – Етапи розроблення і оцінювання комп'ютеризованих моделей

На рисунку 2 наведено етапи оцінювання моделей вогнестійкості будівельних конструкцій [12], які враховують роль верифікації та валідації у цьому процесі. Зазначену схему розроблено на основі основних положень до верифікації та валідації методів розрахунку для пожежно-технічного аналізу, визначених у міжнародному стандарті ISO 16730-1 [3]. Відповідно до неї процедура оцінювання моделей вогнестійкості починається з отримання за результатами випробувань, експериментів або досліджень необхідних знань для опису реальної поведінки будівельних конструкцій при пожежі. При цьому можливий сценарій як реальної пожежі, так і умовної [1]. На основі сприйняття цієї реальної поведінки розробляють концептуальну і математичну моделі. Загалом математична модель складається з моделей теплового і напружено-деформованого станів будівельних конструкцій під час пожежі. Математична модель може враховувати, наприклад,

радіаційно-конвективний теплообмін у газовому середовищі від джерела теплового впливу до поверхні будівельної конструкції, кондуктивний теплообмін у цій конструкції, радіаційно-конвективний теплообмін від цієї конструкції у навколишнє середовище з поверхні конструкції, що не обігрівається. Компоненти математичної моделі можуть відобразити основні фізичні процеси, які

безпосередньо впливають на точність оцінки вогнестійкості окремої будівельної конструкції (чи частини конструктивної системи, чи конструктивної системи у цілому), у тому числі просторовий характер розподілу температур та напружень і неоднорідність будівельної конструкції за структурою і фізичними властивостями її окремих елементів.

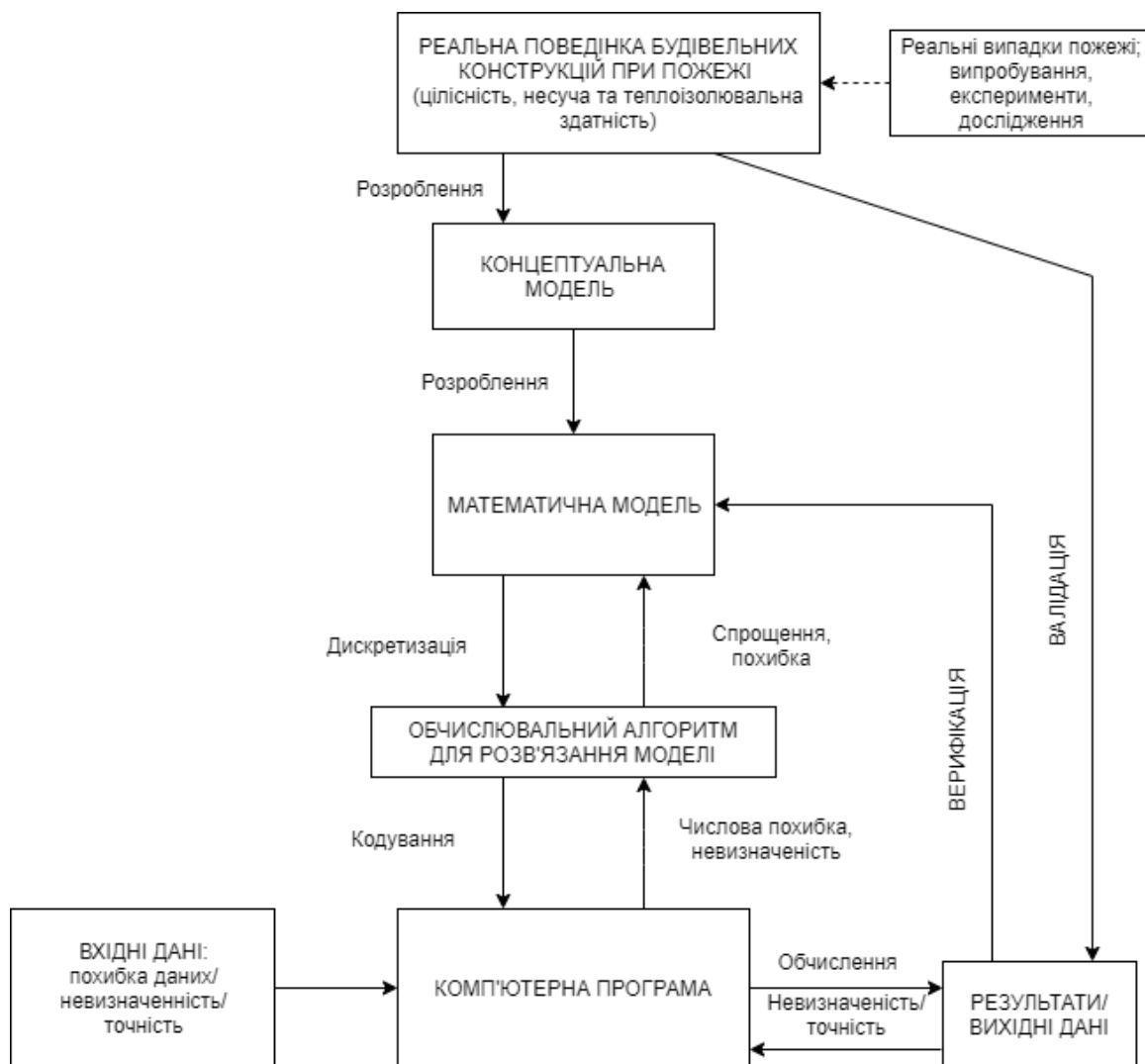


Рисунок 2 – Етапи розроблення й оцінювання моделей вогнестійкості будівельних конструкцій

У процесі валідації встановлюють діапазон застосування методу розрахунку вогнестійкості й визначають його точність (ступінь, за якої метод розрахунку відповідає реальності) в прийнятному діапазоні [2, 3]. Слід відзначити, що навіть для найпростіших завдань з оцінки пожеж не існує універсальних аналітичних рішень. Тобто для такого роду завдань немає точних рішень в аналітичному вигляді. Однак існує можливість виконати два типи перевірки. Перший тип являє собою спосіб, за якого окремі алгоритми звіряють з експериментальними

даними, отриманими за реальних умов. Другий тип складається з простих експериментів, наприклад, щодо теплопровідності та випромінювання, результати в яких асимптотичні. Наприклад, у простому випробуванні з одним приміщенням при відсутності загоряння температура повинна асимптотично приходити у рівновагу до єдиного значення. Модель повинна бути в змозі відтворити цю поведінку. У стандарті ISO 16730-1 [3] передбачено дві процедури валідації. Ці процедури називаються "сліпою" і

"відкритою" валідацією. Під час проведення процедури "сліпої" валідації сторона, яка проводить валідацію, має дані лише щодо початкових і граничних умов експерименту, необхідні для застосування методу розрахунку, що проходить валідацію. Ці дані можуть містити будь-який параметр (наприклад, швидкість виділення тепла), для якого прогнозує здатність моделі не перевіряється. Сторона, яка проводить валідацію, не має доступу до результатів експериментальних вимірювань вихідних даних методу розрахунку, що проходить валідацію. У "відкритій" процедурі сторона, яка проводить валідацію, має дані щодо початкових і граничних умов експерименту, а також результати вимірювання вихідних параметрів методу розрахунку, що проходить валідацію. У всіх випадках валідацій мають бути обрані показники, значення яких підлягають порівнянню. Якщо модель пройшла валідацію для загальної швидкості виділення тепла, це не означає, що вона пройшла валідацію для інших параметрів.

Процес верифікації полягає у перевірці правильності розв'язання математичної моделі (правильності програмного коду) і оцінці числових похибок, які виникають за рахунок округлення, усічення і дискретизації [2, 3]. Похибки округлення з'являються внаслідок того, що комп'ютери надають дійсні числа, використовуючи кінцеве число розрядів. Похибки усічення виникають при заміні безперервного процесу кінцевим. Наприклад, такі похибки можуть відбуватися, коли нескінченний ряд усікається після кінцевого числа членів або коли повторна дія припиняється після того, як критерій збіжності був задоволений. Похибки дискретизації виникають, коли безперервний процес, такий як обчислення похідної, апроксимується дискретним аналогом, таким як кінцева різниця. Позитивні результати, отримані при верифікації, не свідчать про те, що розрахункові рівняння є придатними, а тільки визначають, що рівняння реалізуються і розв'язуються правильно.

Для валідації експериментальних і розрахункових методів оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій необхідно мати дані щодо реальної поведінки будівельних конструкцій під час пожежі [2 – 4]. Якщо розглядають методи, які призначені для визначення теплового і (або) напружено-деформованого станів будівельних конструкцій під час пожежі, то дані щодо реальної поведінки отримати можна (за результатами випробувань,

експериментів або досліджень). Проблематичним є отримання таких даних у разі, якщо метод призначено для визначення товщини вогнезахисту будівельних конструкцій, за якої забезпечується їхня вогнестійкість у широкому діапазоні змінювання параметрів цих конструкцій. Це пов'язано, зокрема, з відсутністю (неможливістю створення) зразків конструкцій з визначеними властивостями, які можуть бути застосовані для валідації таких методів. Тому є підстави вважати, що недостатня визначеність процедур оцінювання методів визначення характеристик вогнестійкості будівельних конструкцій обумовлює необхідність проведення досліджень у цьому напрямі.

**Мета і завдання дослідження.** Зважаючи на зазначене, застосування зразків конструкцій з визначеними властивостями для валідації методів, призначених для визначення товщини вогнезахисту будівельних конструкцій, за якої забезпечується їхня вогнестійкість у широкому діапазоні змінювання параметрів цих конструкцій, метою дослідження було поставлено розроблення процедури валідації таких методів.

Для досягнення цієї мети необхідно було розв'язати такі завдання:

- визначити складові процедури валідації методів, призначених для визначення значень товщини вогнезахисту будівельних конструкцій, за яких забезпечується їхня вогнестійкість у широкому діапазоні змінювання параметрів цих конструкцій;

- оцінити придатність цієї процедури валідації шляхом її застосування для одного з методів, призначених для визначення товщини вогнезахисту будівельних конструкцій.

**Методи дослідження.** Методи, призначені для визначення значень товщини вогнезахисту будівельних конструкцій, за яких забезпечується їхня вогнестійкість у широкому діапазоні змінювання параметрів цих конструкцій, встановлено у різних частинах серії стандартів EN 13381, що мають загальну назву «Методи випробування з метою визначення впливу на вогнестійкість елементів конструкцій». Кожний з цих методів має дві складові – експериментальну і розрахункову. У експериментальній частині для стандартного набору зразків конструкцій проводять вимірювання їхньої температури в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом. У розрахунковій частині за отриманими експериментальними даними щодо температури зразків конструкцій

за наведеною у стандартах розрахунковою процедурою визначають значення товщини вогнезахисту конструкцій, за яких забезпечується їхня вогнестійкість у широкому діапазоні змінювання параметрів цих конструкцій. Тому ці методи можна умовно називати експериментально-розрахунковими методами [13, 14].

Враховуючи те, що для валідації таких експериментально-розрахункових методів проблематичним є застосування зразків конструкцій з визначеними властивостями через відсутність можливості щодо їхнього створення, є доцільним у процедурі їхньої валідації впровадити етап, який полягає у проведенні обчислювального експерименту [13, 14]. На цьому етапі замість проведення натурального експерименту здійснюють розрахункове визначення температурного стану зразків конструкцій в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом. При цьому задають точні (умовно) дані щодо їхніх теплофізичних властивостей – коефіцієнта теплопровідності й питомої теплоємності. Отримані розрахункові дані щодо температурного стану зразків вважають дійсними (точними) значеннями температури зразків. За цими даними із застосуванням розрахункової процедури, наведеної у експериментально-розрахунковому методі, визначають значення товщини вогнезахисту будівельної конструкції, за яких забезпечується її вогнестійкість у широкому діапазоні змінювання параметрів цієї конструкції. Отримані розрахункові дані порівнюють з розрахунковими (умовно дійсними, точними) значеннями товщини вогнезахисту, які визначають шляхом розв'язання прямої нестационарної задачі теплопровідності [13, 14]. За результатами цього порівняння роблять висновок щодо придатності й діапазону застосування експериментально-розрахункового методу, який оцінюють.

Для оцінювання придатності зазначеної процедури проведено валідацію експериментально-розрахункового методу, призначеного для визначення значень товщини вогнезахисних матеріалів для несучих сталевих конструкцій (колон і балок), положення якого наведено в [15]. Цей метод містить процедуру експериментального вимірювання температури десяти зразків сталевих колон, які облицьовано вогнезахисним матеріалом, для різної тривалості вогневого впливу за стандартним температурним режимом і процедуру розрахунку значень товщини вогнезахисного

матеріалу, за яких забезпечується вогнестійкість захищених сталевих конструкцій у широкому діапазоні змінювання їхніх параметрів. Процедура, яку застосовано для валідації цього методу, є такою.

Розв'язанням прямої задачі теплопровідності за заданими (умовно точними) даними щодо теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу визначають розподіли температури  $\theta_{a,ac}$  у часі в десяти зразках сталевих колон, які мають різні параметри – товщину вогнезахисного матеріалу і зведену товщину сталевого профілю, в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом. За цими температурними даними для кожного зразка визначають значення тривалості  $t_{cr,ac}$  досягнення температури 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C, 600°C, 650°C, 700°C, 750°C. За отриманими даними щодо тривалості  $t_{cr,ac}$  із застосуванням одного з методів оброблення експериментальних даних, наведених в [15], визначають розрахункові дані щодо теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу і тривалості  $t_{a,cul}$  досягнення зазначених вище температур. За результатами порівняння цієї тривалості зі значеннями тривалості  $t_{cr,ac}$  встановлюють придатність отриманих розрахункових даних щодо теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу за такими критеріями:

- для кожного зразка розрахункова тривалість  $t_{a,cul}$  не повинна перевищувати більш ніж на 30 % тривалості  $t_{cr,ac}$ ;
- середнє значення різниці між розрахунковою тривалістю  $t_{a,cul}$  і тривалістю  $t_{cr,ac}$  для кожного зразка має бути менше нуля;
- максимум 20 % всіх значень різниці між розрахунковою тривалістю  $t_{a,cul}$  і тривалістю  $t_{cr,ac}$  мають бути більше нуля.

Якщо вищевказані критерії придатності не виконуються, то проводять модифікацію (коригування значень) даних щодо теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу, за результатами якої визначають дані, які задовольняють зазначені критерії.

Із використанням отриманих розрахункових даних щодо теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу визначають розрахункові значення мінімальної товщини  $d_{p,cul}$  вогнезахисного матеріалу, за яких забезпечуються нормовані межі вогнестійкості  $t_{fi,requ}$  конструкцій з різною зведеною товщиною сталевого профілю  $V/A_p$  (або різним коефіцієнтом перерізу  $A_p/V$ ). При цьому загалом розглядають нормовані значення межі вогнестійкості 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180 і 240

хв, критичні температури стали 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750°C, зведені товщини сталевого профілю, які відповідають коефіцієнтам перерізу від 40 до 400 м<sup>-1</sup> з кроком 20 м<sup>-1</sup>.

Отримані розрахункові дані щодо товщини  $d_{p,cul}$  порівнюють зі значеннями  $d_{p,ac}$ , які визначають шляхом розв'язання прямої задачі теплопровідності за точними даними щодо теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу. Для врахування похибки вимірювання температури зразків колон під час проведення натурних експериментів додатково здійснюють порівняння товщини  $d_{p,ac}$  з даними щодо товщини  $d_{p,cul}$ , визначеними із застосуванням так званих збурених даних щодо температури зразків сталевих колон. За результатами цих порівнянь роблять висновок щодо придатності й діапазону застосування експериментально-розрахункового методу, призначеного для визначення значень товщини вогнезахисних матеріалів для несучих сталевих конструкцій (колон і балок) [15].

**Результати дослідження.** При дослідженні розглядали гіпотетичні (умовні) вогнезахисні матеріали, які забезпечують вогнезахист сталевій конструкції за рахунок низької теплопровідності (далі – вогнезахисний матеріал №1) і високої теплоємності (далі – вогнезахисний матеріал №2). Вважали, що для цих вогнезахисних матеріалів значення теплофізичних властивостей є сталими (не залежать від температури) й становлять:

– для вогнезахисного матеріалу №1: коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_p = 0,03$  Вт/(м °С), питома об'ємна теплоємність  $c_p \rho_p = 3 \cdot 10^4$  Дж/(м<sup>3</sup> °С);

$$\Delta \theta_{a,t} = \left[ \frac{\lambda_{p,t}/d_p}{c_a \rho_a} \times \frac{A_p}{V} \times \left( \frac{1}{1 + \phi/3} \right) \times (\theta_t - \theta_{a,t}) \Delta t \right] - \left[ (e^{\phi/10} - 1) \Delta \theta_t \right], \quad (2)$$

де  $\Delta \theta_{a,t}$  – підвищення температури сталевій колони за проміжок часу  $\Delta t$ , °С;

$\Delta \theta_t$  – підвищення температури газового середовища за проміжок часу  $\Delta t$ , °С;

$\theta_{a,t}$  – температура сталевій колони для тривалості  $t$ , °С;

$\theta_t$  – температура газового середовища за стандартного температурного режиму для тривалості  $t$ , °С;

$d_p$  – товщина вогнезахисного матеріалу, м;

$c_a$  – питома масова теплоємність сталі, Дж/(кг °С);

$\rho_a$  – густина сталі, кг/ м<sup>3</sup>;

$\Delta t$  – розрахунковий проміжок (крок) часу, с;

– для вогнезахисного матеріалу №2: коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_p = 0,3$  Вт/(м °С), питома об'ємна теплоємність  $c_p \rho_p = 3 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup> °С).

Розв'язання прямої задачі теплопровідності для визначення значень температури  $\theta_{a,ac}$  і тривалості  $t_{cr,ac}$  для зразків колон і товщини  $d_{p,ac}$  вогнезахисного матеріалу виконано за методом кінцевих різниць по неявній схемі апроксимації із застосуванням математичної моделі, яку наведено в [16, 17]. Ця модель містить, зокрема, рівняння складного радіаційно-конвективного теплообміну на поверхні вогнезахисного матеріалу і таке рівняння теплопровідності у шарі вогнезахисного матеріалу:

$$c_p \rho_p \frac{\partial \theta_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} \right), \quad (1)$$

де  $x$  – координата, м;

$t$  – тривалість вогневого впливу, с;

$\theta_p$  – температура вогнезахисного матеріалу, °С;

$\lambda_p$  – коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного матеріалу, Вт/(м °С);

$c_p$  – питома масова теплоємність вогнезахисного матеріалу, Дж/(кг °С);

$\rho_p$  – густина вогнезахисного матеріалу, кг/ м<sup>3</sup>.

Для оброблення даних щодо тривалості  $t_{cr,ac}$  застосовували два методи [15], які призначені для визначення товщини  $d_{p,cul}$  вогнезахисного матеріалу: методи, засновані на розв'язанні диференційного рівняння теплопровідності (наближення:  $\lambda_p$  – стала,  $\lambda_p$  – змінна).

$\phi$  – коефіцієнт, який розраховують за такою формулою:

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \times d_p \times \frac{A_p}{V}, \quad (3)$$

Розрахунок теплофізичних властивостей вогнезахисного матеріалу для методу зі сталим коефіцієнтом теплопровідності проводили з використанням формули (4), для методу зі змінним коефіцієнтом теплопровідності – формули (5).

$$\lambda_p(\theta_d, d_p) = C_0 + C_1 \theta_d + C_2 d_p, \quad (4)$$

де  $C_0, C_1, C_2$  – розрахункові коефіцієнти.

$$\lambda_{p,t}(t) = \left[ d_p \times \frac{V}{A_p} \times c_a \rho_a \times (1 + \phi / 3) \times \frac{1}{(\theta_t - \theta_{a,t}) \Delta t} \right] \times [\Delta \theta_{a,t} + (e^{\phi/10} - 1) \Delta \theta_t]. \quad (5)$$

Порівняння отриманих розрахункових даних щодо товщини  $d_{p,cul}$  зі значеннями товщини  $d_{p,ac}$  здійснювали із застосуванням такої формули:

$$\delta_d = 100(d_{p,cul} - d_{p,ac}) / d_{p,ac}. \quad (6)$$

За цією формулою визначено дані щодо різниці  $\delta_d$  для вогнезахисних матеріалів №1, №2 для вищевказаного діапазону змінювання значень нормованої межі вогнестійкості, критичної температури сталі й зведеної товщини сталевго профілю. Результати розрахунку різниці  $\delta_d$ , отримані за методом зі змінним коефіцієнтом теплопровідності для вогнезахисного матеріалу №1, для деяких значень нормованої межі вогнестійкості,

критичної температури сталі й зведеної товщини сталевго профілю, як приклад, наведено в таблиці 1. Дані щодо узагальнення значень цієї різниці для вогнезахисних матеріалів №1 і №2 наведені у таблицях 2, 3. У цих таблицях окрім даних, отриманих за точними температурами  $\theta_{a,ac}$  зразків колон, надано дані, визначені із застосуванням збурених даних щодо температури зразків колон. Ці збурені дані імітують похибки вимірювання температури зразків колон під час проведення натурних експериментів і визначено шляхом внесення у точні значення температури  $\theta_{a,ac}$  похибки до 10 % за допомогою генератора випадкових чисел [13, 18].

Таблиця 1 – Дані щодо різниці  $\delta_d$ , отримані для вогнезахисного матеріалу №1 за методом зі змінним коефіцієнтом теплопровідності за точними даними щодо температури  $\theta_{a,ac}$  зразків колон

Нормована межа вогнестійкості $t_{fi,requ}$ , хв	30			120			240		
	350	500	750	350	500	750	350	500	750
Критична температура сталі $\theta_{cr}$ , °C	350	500	750	350	500	750	350	500	750
Зведена товщина сталевго профілю $V/A_p$ , мм	Різниця $\delta_d$ , %								
2,5	8,02	10,19	59,95	34,52	34,55	36,37	70,75	74,43	71,13
5,0	4,74	8,99	112,65	14,51	13,13	13,61	33,22	30,99	26,07
16,7	13,46	37,64	–	0,65	0,03	3,92	4,23	1,85	0,01

Таблиця 2 – Діапазони змінювання різниці  $\delta_d$  і кількість значень цієї різниці в інтервалах цих діапазонів, визначені за методом зі сталим коефіцієнтом теплопровідності вогнезахисного матеріалу

Варіант розв'язання задачі	Діапазон змінювання різниці $\delta_d$ , %	Кількість значень (%) різниці $\delta_d$ у таких інтервалах:		
		до 10 %	від 10 % до 50 %	понад 50 %
Матеріал №1: точні дані: збурені дані:	від 0 до 111	50	38	12
	від 1 до 141	23	58	19
Матеріал №2: точні дані: збурені дані:	від –24 до 101	46	50	4
	від –24 до 107	46	46	8

Таблиця 3 – Діапазони змінювання різниці  $\delta_d$  і кількість значень цієї різниці в інтервалах цих діапазонів, визначені за методом зі змінним коефіцієнтом теплопровідності вогнезахисного матеріалу

Варіант розв’язання задачі	Діапазон змінювання різниці $\delta_d$ , %	Кількість значень (%) різниці $\delta_d$ у таких інтервалах:		
		до 10 %	від 10 % до 50 %	понад 50 %
Матеріал №1:				
точні дані:	від 0 до 113	35	46	19
збурені дані:	від 5 до 125	15	50	35
Матеріал №2:				
точні дані:	від -27 до 126	50	38	12
збурені дані:	від -27 до 134	54	35	11

**Обговорення результатів дослідження.**

Як впливає з отриманих результатів, розрахункові значення товщини вогнезахисного матеріалу, отримані методами зі сталим і змінним коефіцієнтом теплопровідності, можуть значно відрізнятися від їхніх дійсних (точних) величин. Різниця між ними досягає 141 %. Це можна пояснити тим, що у зазначених методах застосовано рівняння теплопровідності (2), яке передбачає, що температура на поверхні вогнезахисного матеріалу дорівнює температурі газового середовища  $\theta_i$ , що змінюється за стандартним температурним режимом. Крім цього, для розрахунку коефіцієнта теплопровідності у цих методах впроваджено спрощені алгоритми розв’язання оберненої задачі теплопровідності.

Для вогнезахисного матеріалу №1 (з низькою теплопровідністю) всі розрахункові значення товщини перевищують її точні величини. Для вогнезахисного матеріалу №2 (з високою теплоемністю) переважна кількість розрахункових значень товщини перевищує її точні величини і лише декілька відсотків отриманих даних менші точних значень. Це свідчить про те, що всі отримані для цих матеріалів результати є прийнятними з точки зору забезпечення вогнестійкості несучих сталевих конструкцій з їхнім застосуванням. Із зазначеного можна зробити висновок про придатність експериментально-розрахункового методу, призначеного для визначення значень товщини вогнезахисних матеріалів для несучих сталевих конструкцій (колон і балок) [15], при застосуванні двох процедур оброблення експериментальних даних, заснованих на розв’язанні диференційного рівняння теплопровідності (наближення:  $\lambda_p$  – стала,  $\lambda_r$  – змінна).

Значення різниці між розрахунковою і точною товщиною вогнезахисних матеріалів, отримані за збуреними даними щодо температури зразків сталевих колон, незначно

відрізняються від величин, отриманих за точними даними щодо цієї температури. Це свідчить про стійкість розглянутих методів оброблення експериментальних даних стосовно похибки вимірювання температури зразків колон. Діапазон змінювання цієї різниці для методу із сталим коефіцієнтом теплопровідності вогнезахисного матеріалу співпадає з діапазоном, визначеним для методу із змінним коефіцієнтом теплопровідності. Це дозволяє стверджувати про рівнозначність застосування таких методів за точнісними показниками. Таке ствердження можна вважати за доцільне з практичної точки зору щодо вибору метода оброблення експериментальних даних. Однак неможливо не зазначити, що результати проведеного дослідження мають певну невизначеність. Це проявляється, у першу чергу, в тому, що при дослідженні було застосовано вогнезахисні матеріали, які мають сталі теплофізичні властивості. При використанні під час валідації метода вогнезахисних матеріалів зі змінними теплофізичними властивостями не виключена можливість отримання результатів, які будуть відрізнятися від отриманих у даному дослідженні. Можливість отримання таких же результатів неможна виключити і при застосуванні розв’язання трьохвимірної прямої задачі теплопровідності замість розв’язання одновимірної. Крім цього, не було досліджено вплив напружено-деформованого стану зразків сталевих конструкцій під час випробування на результати визначення товщини вогнезахисних матеріалів за методом, який оцінювали. Неможливість зняти названі обмеження у рамках даного дослідження породжує потенційно цікавий напрям подальших досліджень. Вони, зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення впливу теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів і напружено-деформованого стану зразків сталевих конструкцій під час випробування на точнісні показники методу. Таке виявлення



дозволить визначити більш прийнятні процедури оцінювання методу й оброблення експериментальних даних із підвищеною точністю.

**Висновки.** Проведеним дослідженням визначено особливості оцінювання методів визначення характеристик вогнестійкості будівельних конструкцій. Встановлено, що для валідації експериментально-розрахункових методів, призначених для визначення товщини вогнезахисту будівельних конструкцій, за якої забезпечується їхня вогнестійкість у широкому діапазоні змінювання параметрів цих конструкцій, неможливе застосування зразків конструкцій з визначеними властивостями через неспроможність їхнього створення, і запропоновану процедуру такої валідації із застосуванням методу обчислювального експерименту.

Визначено придатність запропонованої процедури валідації шляхом її застосування для експериментально-розрахункового методу, призначеного для визначення товщини

вогнезахисних матеріалів для несучих сталевих конструкцій (колон і балок). Встановлено, що переважна кількість розрахункових значень товщини вогнезахисних матеріалів, визначених за цим методом, перевищує її дійсні величини, що свідчить про прийнятність отриманих результатів з точки зору забезпечення вогнестійкості несучих сталевих конструкцій. З'ясовано, що різниця між розрахунковими й дійсними значеннями товщини вогнезахисних матеріалів може досягати значної величини (у два рази й більше).

Визначено напрям подальших досліджень, які орієнтовані на виявлення впливу теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів і напружено-деформованого стану зразків сталевих конструкцій під час випробування на точнісні показники методу, що дозволить визначити більш прийнятні процедури оцінювання методу й оброблення експериментальних даних з підвищеною точністю.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT).
2. ISO 16730:2008 Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods (Пожежно-технічний аналіз. Оцінювання, верифікація та валідація методів розрахунку).
3. ISO 16730-1:2015 Fire safety engineering – Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods – Part 1: General (Пожежно-технічний аналіз. Процедури та вимоги до верифікації та валідації методів розрахунку. Частина 1. Загальні положення).
4. ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2017, IDT).
5. ISO 5725 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Parts 1-6 (Точність (вірогідність та прецизійність) методів вимірювання та результатів. Частина 1-6).
6. Magnusson B. and Örnemark (eds.) U. Eurachem Guide: The Fitness for Purpose of Analytical Methods – A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics, (2nd ed. 2014). ISBN 978-91-87461-59-0.
7. ISO/TR 16730-2:2013 Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods – Part 2: Example of a fire zone model (Пожежно-технічний аналіз. Оцінювання, верифікація та валідація методів розрахунку. Частина 2. Приклад зонної моделі пожежі).
8. ISO/TR 16730-3:2013 Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods – Part 3: Example of a CFD model (Пожежно-технічний аналіз. Оцінювання, верифікація та валідація методів розрахунку. Частина 3. Приклад моделі обчислювальної гідродинаміки).
9. ISO/TR 16730-4:2013 Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods – Part 4: Example of a structural model (Пожежно-технічний аналіз. Оцінювання, верифікація та валідація методів розрахунку. Частина 4. Приклад моделі конструкції).
10. ISO/TR 16730-5:2013 Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods – Part 5: Example of an Egress model (Пожежно-технічний аналіз. Оцінювання, верифікація та валідація методів розрахунку. Частина 5. Приклад моделі евакуації).
11. Bénichou N. Structural Response Model for Wood Stud Wall Assemblies / N. Bénichou, D. Morgan // Theory Manual, Research Report – Institute for Research in Construction, National Research Council Canada – 2003. – Vol. 128, April 01. – P. 10.
12. Новак С.В. Валідація та верифікація методів розрахунку вогнестійкості будівельних конструкцій / С.В. Новак, М.С. Новак // Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» 18-19 травня 2018 р. – Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2018. – С. 184–185.
13. Круковский П. Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход) – Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 1996. – 218 с.
14. Определение границ применимости и точности стандартизированных методов оценки огнестойкости покрытий несущих металлических конструкций / С.В. Новак, Н.Б. Григорьян, П.Г. Круковский // Науковий вісник УкрНДІПБ. – К.: УкрНДІПБ, 2014. – № 1 (29). – С. 50–59.
15. ДСТУ Б В.1.1-17:2007. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності (ENV 13381-4:2002, NEQ).

16. DSTU-N B V.2.6-211:2016 Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість.
17. Novak S.V. Identification of thermophysical characteristics of the fire-protective coatings according to the data of testing on fire-resistance / S.V. Novak, I.A. Kharchenko, P.G. Krukovsky // 2nd European Thermal-Sciences and

- 14th UIT National Heat Transfer Conference 1996. – Rome, Italy: Edizioni ETS. – 1996. – Vol. 2. – P. 689–694.
18. Цвиркун С.В. Усовершенствование метода определения огнезащитной способности покрытий металлических конструкций: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 21.06.02 «пожарная безопасность» / С.В. Цвиркун. – Киев, 2006. – 20 с.

## REFERENCES

- DSTU-N B EN 1991-1-2:2010 Evrokod 1. Diї na konstrukcii. Chastina 1-2. Zagal'ni diї. Diї na konstrukcii pid chas pozhezhi (EN 1991-1-2:2002, IDT).
- ISO 16730:2008 Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods.
- ISO 16730-1:2015 Fire safety engineering – Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods – Part 1: General.
- DSTU ISO/IEC 17025:2017 Zagal'ni vimogi do kompetentnosti viprobuval'nih ta kalibruval'nih laboratorij (ISO/IEC 17025:2017, IDT).
- ISO 5725 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Parts 1-6
- Magnusson B. and Örnemark (eds.) U. Eurachem Guide: The Fitness for Purpose of Analytical Methods – A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics, (2nd ed. 2014). ISBN 978-91-87461-59-0.
- ISO/TR 16730-2:2013 Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods – Part 2: Example of a fire zone model (Pozhezhno-tehnichnij analiz. Ocinjuvannja, verifikacija ta validacija metodiv rozrahunku. Chastina 2. Priklad zonnioi modeli pozhezhi).
- ISO/TR 16730-3:2013 Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods – Part 3: Example of a CFD model.
- ISO/TR 16730-4:2013 Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods – Part 4: Example of a structural model.
- ISO/TR 16730-5:2013 Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods – Part 5: Example of an Egress model.
- Bénichou N. Structural Response Model for Wood Stud Wall Assemblies / N. Bénichou, D. Morgan // Theory Manual, Research Report – Institute for Research in Construction, National Research Council Canada – 2003. – Vol. 128, April 01. – P. 10.
- Novak S.V. Validacija ta verifikacija metodiv rozrahunku vognestijkosti budivel'nih konstrukcij / S.V. Novak, M.S. Novak // Materiali IH Mizhnarodnoi naukoivo-praktichnoi konferencii «Teorija i praktika gasinnja pozhezih ta likvidacii nadzvichajnih situacij» 18-19 travnja 2018 r. – Cherkasi: Cherkas'kij institut pozhezihnoi bezpeki im. Geroiv Chornobilja NUCZ Ukraїni, 2018. – S. 184–185.
- Krukovskij P. G. Obratnye zadachi teplomassoperenosa (obshhij inzhenernyj podhod) – Kiev: Institut tehnichekoj teplofiziki NAN Ukrainy, 1996. – 218 s.
- Opređenje granic primenimosti i tochnosti standartizirovannyh metodov ocenki ogneshhitnoj sposobnosti pokrytij nesushhijh metallicheskih konstrukcij / S.V. Novak, N.B. Grigor'jan, P.G. Krukovskij // Naukovij visnik UkrNDIPB. – K.: UkrNDICZ, 2014. – № 1 (29). – S. 50–59.
- DSTU B V.1.1-17:2007. Vognezahisni pokrittja dlja budivel'nih nesuchih metalevih konstrukcij. Metod viznachennja vognezahisnoi zdatnosti (ENV 13381-4:2002, NEQ).
- DSTU-N B V.2.6-211:2016 Proektuvannja stalevih konstrukcij. Rozrahunok konstrukcij na vognestijkist'.
- Novak S.V. Identification of thermophysical characteristics of the fire-protective coatings according to the data of testing on fire-resistance / S.V. Novak, I.A. Kharchenko, P.G. Krukovsky // 2nd European Thermal-Sciences and 14th UIT National Heat Transfer Conference 1996. – Rome, Italy: Edizioni ETS. – 1996. – Vol. 2. – P. 689–694.
- Cvirkun S.V. Usovershenstvovanie metoda opredelenija ogneshhitnoj sposobnosti pokrytij metallicheskih konstrukcij: avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni kand. tehn. nauk: spec. 21.06.02 «pozhar'naja bezopasnost'» / S.V. Cvirkun. – Kiev, 2006. – 20 s.

## PECULIARITIES OF EVALUATION OF METHODS OF DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF FIRE RESISTANCE OF BUILDING STRUCTURES

S. Novak<sup>1</sup>, Cand. of Sc. (Eng.), Sen. St. Sc., M. Novak<sup>2</sup>, O. Bedryuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Ukrainian Civil Protection Research Institute, Ukraine

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky», Ukraine

### KEYWORDS

building design, fire protection material, fire resistance, method evaluation, validation, verification

### ANNOTATION

The results of the study aimed at further improvement and development of procedures for evaluating methods of determining the fire resistance characteristics of building structures are presented. The features of estimation of methods of determination of characteristics of fire resistance of building structures are determined. It is established that for the validation of experimental-calculation methods intended to determine the thickness of fire protection of building structures, which ensures their fire resistance in a wide range of parameters of these structures, it is impossible to use samples of structures with certain properties due to their inability to create. A procedure for such validation using a computational experiment method is proposed. In this procedure, accurate (conditional) temperature data for steel column specimens are determined by solving a direct one-dimensional non-stationary thermal conductivity problem. The validity of the proposed validation procedure by its application for the experimental calculation method, designed to determine the thickness of fire protection materials for load-bearing steel structures (columns and beams), has been established. It is established that the overwhelming number of calculated values of the thickness of the fire protection materials, determined by this method, exceeds its true values, which indicates the acceptability of the obtained results in terms of providing fire resistance of load-bearing steel structures. It is established that the difference between the calculated and actual values of the thickness of the fire protection materials can reach a considerable value (twice or more). The direction of further researches which are focused on revealing of influence of thermophysical properties of fire protection materials and stress-deformed state of samples of steel structures during the test on the accuracy of the method. This will identify more appropriate procedures for evaluating the method and processing the experimental data with increased accuracy.

## ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОГНЕСТОЙКОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С.В. Новак<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., М.С. Новак<sup>2</sup>, О.И. Бедратюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты, Украина

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Украина

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

валидация, верификация, огнезащитный материал, огнестойкость, оценивание метода, строительная конструкция

### АННОТАЦИЯ

Приведены результаты исследования, направленного на дальнейшее совершенствование и развитие процедур оценивания методов определения характеристик огнестойкости строительных конструкций. Определены особенности оценивания методов определения характеристик огнестойкости строительных конструкций. Предложена процедура валидации экспериментально-расчетных методов, предназначенных для определения толщины огнезащиты строительных конструкций, при которой обеспечивается их огнестойкость в широком диапазоне изменения параметров этих конструкций, основанная на проведении вычислительного эксперимента. Установлена пригодность предложенной процедуры валидации путем ее применения для экспериментально-расчетного метода, предназначенного для определения толщины огнезащитных материалов для несущих стальных

конструкций (колонн и балок). Определено направление дальнейших исследований, которые ориентированы на выявление влияния теплофизических свойств огнезащитных материалов и напряженно-деформированного состояния образцов стальных конструкций при испытании на точностные показатели метода, позволяющего определить более приемлемые процедуры оценивания метода и обработки экспериментальных данных с повышенной точностью.