УДК 004.412:614.841.45

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ У ВОГНЕЗАХИСНОМУ ПОКРИВІ НА СТАЛЕВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЯХ ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ

Новак М.С.[1]; Харкянен О.В., к.т.н., доц.[2]
[1,2]Національний університет харчових технологій
Україна, Київ
[1]novak.mikhailo.work@gmail.com; [2]helenval@ukr.net

Анотація. *Розроблено процедуру валідації модифікованих методів визначення номінальних теплових показників вогнезахисного покриву, засновану на розв'язанні оберненої та прямої задач теплопровідності, та визначено аналітичні залежності (рівняння регресії), необхідні для її застосування.*
Ключові слова: *валідація методів; вогнезахист конструкцій; задачі теплопровідності; імітаційне моделювання.*

Вступна частина. Для збереженості несучої здатності сталевих будівельних конструкцій (балок, колон тощо) в умовах пожежі на їхню поверхню наносять вогнезахисний покрив (далі – покрив), виконаний із плит, матів або штукатурки, який має певну товщину. Ця товщина повинна бути такою, щоб температура сталі не перевищувала критичної величини, і її визначають на основі даних про номінальні значення теплових (теплозахисних) показників, які встановлюють для покривів різних комерційних марок за допомогою стандартизованих методів, представлених в EN 13381-4:2013 та EN 13381-8:2013. Ці методи ґрунтуються на експериментальному визначенні температури значної кількості сталевих колон (або балок) за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі згідно з EN 1363-1:2020 і використанні алгебраїчного рівняння (формули) теплопровідності для розрахунків коефіцієнта теплопровідності й необхідної мінімальної товщини покриву, за якої температура сталі не перевищує критичного значення. Для зниження витрат, пов’язаних з практичною реалізацією зазначених стандартизованих методів, у праці [1] запропоновано модифіковані методи визначення номінальних теплових показників покриву зі значно зменшеною кількістю експериментальних зразків сталевих конструкцій порівняно з EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013. Однак відсутність даних про ступінь відповідності результатів, отримуваних за допомогою цих модифікованих методів, дійсним значенням теплових показників покриву стримує їхнє впровадження.

Метою дослідження є розробка процедури валідації модифікованих методів визначення номінальних теплових показників вогнезахисного покриву, нанесеного на сталеві будівельні конструкції, яка придатна для визначення достовірних даних про ступінь відповідності між отримуваними за цими методами результатами і дійсними значеннями теплових показників.

Основна частина. Запропонована процедура валідації базується на порівнянні розрахункових значень теплових показників покриву, визначених за допомогою застосовного модифікованого методу, з дійсними значеннями, ідентифікованими шляхом розв'язання оберненої та прямої задач теплопровідності за вдосконаленим розрахунковим методом, представленим у [2], та проведенні перевірочного експерименту. Отримані в цьому експерименті результати вважають прийнятними, якщо відхил виміряного проміжку часу до

досягнення критичної температури від його заданого значення для кожного зразка знаходиться в таких межах [3]:

$$\delta t_{permis,min} \le \delta t_{fr,meas} \le \delta t_{permis,max}\,, \qquad (1)$$

де $\delta t_{fr,meas}$ – відхил результату вимірювання проміжку часу до досягнення критичної температури від його заданого значення, %;

$\delta t_{permis,min}$ і $\delta t_{permis,max}$ – мінімальне і максимальне значення допустимого відхилу результату вимірювання проміжку часу до досягнення критичної температури від його заданого значення, %.

Значення $\delta t_{permis,min}$ і $\delta t_{permis,max}$ залежать від похибок $\delta t_{fr,\theta e}$ і $\delta t_{fr,\theta o}$, зумовлених відхилом фактичного від номінального температурного режиму в печі під час перевірочного експерименту і відхилом фактичної від номінальної початкової температури зразків θ_0.

Для визначення аналітичних залежностей, прийнятних для обчислення $\delta t_{fr,\theta e}$ і $\delta t_{fr,\theta o}$, шляхом застосування методів імітаційного моделювання теплового стану сталевих конструкцій за умов впливу стандартного температурного режиму і лінійного регресійного аналізу проведено оцінювання взаємозв'язку між значеннями цих похибок і показником відхилу фактичного від номінального температурного режиму в печі d_e, відхилом фактичної θ_0 від номінальної початкової температури сталевої конструкції, проміжком часу до досягнення критичної температури t_{fr} і її величиною θ_{cr}. Під час цього оцінювання застосовано розрахунковий метод, за якого визначення температури сталевих конструкцій здійснюють шляхом розв'язання прямої задачі теплопровідності із використанням математичної моделі, яка складається із одномірних диференційних рівнянь нестаціонарної теплопровідності в покриві (2) і сталевій конструкції, рівнянь, що визначають граничні умови складного радіаційно-конвекційного теплообміну на обігрівній поверхні покриву та ідеального теплового контакту на металевій поверхні конструкції [4]. Розв'язання цієї математичної моделі виконують методом скінчених різниць за неявною схемою апроксимації.

$$c_p \rho_p \frac{\partial \theta_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x}\right), \qquad (2)$$

де c_p, ρ_p, λ_p – питома теплоємність, густина і коефіцієнт теплопровідності покриву;

θ_p – температура покриву;

t – тривалість теплового впливу.

Для опису залежностей похибок $\delta t_{fr,\theta e}$ і $\delta t_{fr,\theta o}$ від відхилу d_e, початкової температури θ_0, проміжку часу t_{fr} і критичної температури θ_{cr} застосовано такі рівняння (моделі) лінійної регресії:

$$\delta t_{fr,\theta e} = a_0 + a_1 d_e + a_2 d_e t_{fr} + a_3 \theta_{cr} + a_4 d_e \theta_{cr} + a_5 d_e t_{fr} \theta_{cr} + a_6 t_{fr} \theta_{cr} + a_7 t_{fr}\,; \qquad (3)$$

$$\delta t_{fr,\theta o} = a_0 + a_1 \theta_0 + a_2 \theta_0 t_{fr} + a_3 \theta_{cr} + a_4 \theta_0 \theta_{cr} + a_5 \theta_0 t_{fr} \theta_{cr} + a_6 t_{fr} \theta_{cr} + a_7 t_{fr}\,, \qquad (4)$$

де a_0–a_7 – коефіцієнти регресії.

Розв'язуючи рівняння регресії (3) і (4) за даними щодо $\delta t_{fr,\theta e}$ і $\delta t_{fr,\theta o}$, отриманими шляхом імітаційного експерименту, за допомогою програми для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel, було визначено значення коефіцієнтів регресії a_0–a_7 і підтверджено адекватність та якість цих моделей.

Висновки. Розроблено процедуру валідації модифікованих методів визначення номінальних теплових показників вогнезахисного покриву, засновану на розв'язанні оберненої та прямої задач теплопровідності та проведенні перевірочного експерименту. Шляхом застосування методів імітаційного моделювання і лінійного регресійного аналізу визначено аналітичні залежності, необхідні для обчислення в рамках цієї процедури похибок перевірочного експерименту, зумовлених відхилом фактичного від номінального температурного режиму в печі й відхилом фактичної від номінальної початкової температури зразків сталевих конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Новак, М.С., Смітюх, Я.В. (2024). Автоматизація керування тепловим станом сталевих конструкцій будівель харчової промисловості на основі валідації модифікованих методів визначення теплових показників їхніх вогнезахисних покривів. *Наукові праці НУХТ*, 30(5), 7–24.

[2] Круковський, П.Г., Новак, С.В., Поклонський, В.Г., Єременко, С.А., Фролов, Г.А. (2021). *Оцінка вогнестійкості металевих будівельних конструкцій та вогнезахисної здатності покриттів (розрахунково-експериментальний підхід)* (російською мовою). Київ: Франко Пак.

[3] Новак, М.С., Смітюх, Я.В. (2025). Визначення допустимих відхилів теплового стану сталевих конструкцій під час валідаційних експериментів. *Наукові праці НУХТ*, 31(4), 7–22.

[4] Новак, С.В., Дріжд, В.Л., Добростан, О.В., Новак, М.С. (2022) Вплив теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на тепловий стан сталевих колон за стандартного температурного режиму. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 1(13), 88–110.

Novak M.S., Kharkyanen O.V.

Simulation of heat conduction in fire protection coating on steel building structures during a fire

Abstract*. A procedure for validating modified methods for determining the nominal thermal performance of fire protection coating has been developed, based on solving inverse and direct heat conduction problems, and the analytical dependencies (regression equations) necessary for its application have been determined.*

Keywords: *validation of methods; fire protection of structures; thermal conductivity problems; simulation.*