

## УДК 614.841.332

*А. І. Ковальов<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., докторант (ORCID 0000-0002-6525-7558)*  
*Ю. А. Отрош<sup>2</sup>, д.т.н., професор, нач. каф. (ORCID 0000-0003-0698-2888)*  
*В. І. Томенко<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-7139-9141)*  
*О. В. Пирогов<sup>2</sup>, к.т.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-9858-0801)*  
*Н. Г. Морковська<sup>3</sup>, к.т.н., доц. каф. (ORCID 0000-0001-5265-2025)*

<sup>1</sup>Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, Черкаси, Україна

<sup>2</sup>Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

<sup>3</sup>Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна

## РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Розроблено фізичну та математичну моделі оцінювання вогнестійкості вогнезахисених сталевих конструкцій. При цьому застосовано алгоритм, що включає експериментальні та розрахункові процедури при визначенні вогнестійкості вогнезахисених сталевих конструкцій. Сформульовані початкові та граничні умови при побудові зазначених моделей, які дозволяють з достатньою для інженерних розрахунків точністю прогнозувати вогнестійкість вогнезахисеної сталеві конструкції. Особливістю розроблених моделей є врахування теплофізичних характеристик сталевих конструкцій та вогнезахисних покриттів, особливостей формування режимів пожежі. На основі запропонованих фізичної та математичної моделей розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисених сталевих конструкцій. Проведено перевірку адекватності розробленого методу при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисеної сталеві колони. Побудовано комп'ютерну модель вогнезахисеної сталеві колони для моделювання нестационарного прогріву такої системи в програмному комплексі FRIEND. Наведено результати визначення збіжності експериментальних даних щодо тривалості вогневого впливу за стандартним температурним режимом до досягнення критичної температури сталі з результатами чисельного моделювання в програмному комплексі FRIEND. На основі порівняння результатів експерименту та чисельного моделювання зроблено висновок про адекватність розробленої моделі реальним процесам, що відбуваються при нагріванні вогнезахисених сталевих колон без прикладення навантаження в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму пожежі.

**Ключові слова:** вогнестійкість, метод оцінювання вогнестійкості, вогнезахист, будівельні конструкції, вогнезахисна здатність, температурні режими пожежі

### 1. Вступ

У світі сьогодні існує понад 250 країн, в яких проживає 7,2 мільярдів людей. У них щорічно виникає 7-8 мільйонів пожеж, на яких гине приблизно 85-90 тисяч людей.

Близько 51% всіх пожеж в цих країнах виникають в будівлях і спорудах та на транспорті, і при цьому на пожежах гине більшість (90-95%) від всіх жертв на пожежах. Винятком є Барбадос, Польща і Португалія, де пожежі в будівлях і на транспорті в сумі складають менше 22% від загального їх числа, а також Литва і Естонія – менше 30% від усіх пожеж. Зате в Росії, Україні та Сінгапурі пожежі в будівлях і на транспорті становлять в сумі не менше 75% всіх пожеж. Кількість пожеж в Україні, що сталися у будівлях та спорудах упродовж 2007÷2020 років, в середньому, складає 52,7 % від загальної чисельності, а кількість загиблих на них – 95,5 %. Така статистика свідчить про те, що до будівельних конструкцій будівель та споруд повинні висуватися підвищені вимоги щодо їх вогнестійкості. Адже це, в свою чергу, призведе до стійкості будівель і споруд і дасть змогу безпечно евакуюватися людям та ефективно проводити оперативні дії рятувальним підрозділам. Цього можливо досягти, використовуючи в будівлях та спорудах вогнезахисених будівельних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами систем вогнезахисту.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Питаннями оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій займалися та займаються багато відомих вчених. В [1] наведені експериментальні та розрахункові дані щодо визначення температури сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за стандартним режимом пожежі. Автори аналізують можливість використовувати зразки зменшених розмірів і іншої форми, ніж розміри і форми стандартизованих зразків сталевих конструкцій для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій. Проте не наводяться методи визначення вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій. У [2] розглядаються результати експериментальних випробувань сталевих пластин різних розмірів з вогнезахисним покриттям на водній основі, що спрямовані на дослідження теплових властивостей та співвідношення зміни температури та товщини покриття в умовах випробувань сталевих пластин різної товщини при стандартному температурному режимі або режимі пожежі, яка повільно розвивається. Проте залишилися не вирішеними питання оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій. В роботі [3] описуються експериментальні дослідження поведінки при підвищених температурах незахищених і вогнезахисних сталевих балок, що мають різні розміри і форму отворів. Експерименти показали, що результати випробувань на вогнестійкість вогнезахисних сталевих балок були суперечливими щодо їх поведінки при підвищених температурах, виду матеріалу вогнезахисного покриття і його мінімальної товщини. При цьому відсутні достовірні дані щодо поведінки інших вогнезахисних конструкцій при підвищених температурах. Експериментальні методи оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій є найбільш точними [1–3]. Проте, поряд з перевагами, такі методи мають і недоліки, що проявляються в складності виготовлення зразків, підготовки, доставки і проведення випробувань на вогнестійкість великогабаритних будівельних конструкцій. Це спричиняє значні матеріальні витрати на випробування у акредитованих лабораторіях, унеможливує перенесення результатів випробувань на конструкції всіх типорозмірів та видів. Вищезазначені недоліки породжують значні обмеження використання експериментальних методів оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих та залізобетонних конструкцій. В [4] розроблена модель оцінювання ймовірності втрати несучої здатності будівельної конструкції в результаті пожежі. Однак розроблена модель не дає відповіді на питання щодо її використання при довільних режимах пожежі. В [5] представлені результати теоретичних розрахунків вільно обпертої сталеві балки, підданої впливу стандартного температурного режиму пожежі за допомогою розробленої моделі, створеної в програмному комплексі ANSYS та у програмному забезпеченні OpenSEES. При цьому не наводяться дані щодо розрахунків з вогнезахистом. У [6] представлені результати детальної оцінки методу, який можна використовувати для прогнозування поведінки реактивного вогнезахисного покриття для захисту сталевих конструкцій і теплопровідності в різних умовах (зміна коефіцієнта перерізу сталі, товщини покриття і виду пожежного впливу). Проте відсутні достовірні дані про використання методу для пасивних вогнезахисних покриттів та впливу кліматичних факторів. У [7] проведено прогнозування вогнестійкості будівельних конструкцій на основі моделі для проектування реактивних вогнезахисних покриттів, що включає теплофізичні характеристики покриття. Проте в даній моделі не враховуються такі параметри моделі як зміна температурного режиму пожежі, теплофізичні характеристики поверхні,

що захищається. У [8] були досліджені реактивні вогнезахисні покриття та вивчені їх експлуатаційні характеристики з використанням чотирьох різних, але схожих, кривих нагрівання з різними максимальними температурами (стандартна температурна крива час-температура, крива вуглеводневої пожежі і дві самостійно розроблені криві зі зниженою температурою). Проте, не в повній мірі були досліджені питання впливу температурних режимів пожежі на точність оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій. Автори у [9] пропонують використовувати при розрахунках температури вогнезахисних сталевих конструкцій при пожежі постійне значення коефіцієнту теплопровідності реактивного вогнезахисного покриття, так як це не впливає на точність розрахунків. Проте, як відомо, найбільша точність розрахунків саме при значенні коефіцієнту теплопровідності вогнезахисного покриття, який залежить від температури. В [10] приведено результати визначення розрахунковими методами рівномірних та нерівномірних розподілів температури по перерізу сталеві балки, на яку опирається бетонна плита перекриття, для вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі незахищеної сталеві балки та сталеві балки, на поверхню якої нанесено вогнезахисну речовину. Розрахунки температури сталеві балки при її рівномірному розподілі були виконані із застосуванням комп'ютерної програми FRIEND, а розрахунки нерівномірних розподілів температури в поперечному перерізі сталеві балки виконані із застосуванням програми ANSYS FLUENT. ANSYS FLUENT дозволяє моделювати процеси теплообміну в трьохвимірній постановці з кращою, в порівнянні з FRIEND, візуалізацією. Проте програма ANSYS FLUENT, на відміну від FRIEND, має більший час прорахунку температурного розподілу в конструкції.

Використання розрахункових методів оцінювання вогнестійкості незахищених та вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій, порівняно з експериментальними, має ряд переваг, що полягають у можливості проведення розрахунків без великих матеріальних затрат, хоча і повинні бути сертифіковані програмні продукти, які коштують дорого, та висококласні спеціалісти, що зможуть правильно і обґрунтовано задавати параметри моделі теплового стану вогнезахисних будівельних конструкцій. Адже неточності у задаванні початкових, граничних умов та неточність у використанні математичних та фізичних моделей теплових процесів, що відбуваються у вогнезахисних конструкціях при тепловому впливі пожежі, можуть призвести до помилкового оцінювання вогнестійкості вогнезахисних будівельних конструкцій, а відтак до прорахунків при проектуванні будівель та споруд з таких конструкцій.

Проведений аналіз дає змогу констатувати тенденцію поширення застосування розрахунково-експериментального методу для оцінювання меж вогнестійкості вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій та вогнезахисної здатності покриттів для таких конструкцій. Оскільки такий метод дозволяє враховувати значення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів та процеси теплообміну у конструкції в умовах впливу різних температурних режимів пожежі, його застосування доцільне під час визначення меж вогнестійкості захищених сталевих будівельних конструкцій та вогнезахисної здатності покриттів для таких конструкцій.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми є відсутність ефективних підходів до оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. Розв'язання даної проблеми призведе до підвищення точності оцінювання вогне-

захищених сталевих конструкцій з достатньою для інженерних розрахунків точністю як з використанням даних експериментальних досліджень, так і за результатами чисельного моделювання в сучасних програмних комплексах.

### 3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні завдання:

– розробити математичну модель та метод оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій;

– розробити алгоритм застосування розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій та надати опис процедур його реалізації;

– перевірити працездатність розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій на прикладі дослідження сталевих колон двотаврового перерізу з реактивним вогнезахисним покриттям «Amotherm Steel Wb».

### 4. Розробка математичної моделі оцінювання вогнестійкості вогнезахищеної сталеві конструкції

Математична модель для оцінювання вогнестійкості вогнезахищеної сталеві конструкції включає в себе врахування таких чинників: температурний режим пожежі, теплофізичні характеристики поверхні, що захищається, та вогнезахисних покриттів, кліматичні фактори [11-12].

Фізична модель теплопровідності в системі «сталеві конструкція – вогнезахисне покриття» представляє собою нагрівання двошарової системи, що складається із шару сталі товщиною  $d_a/2=V/A_p$  і шару вогнезахисного покриття, що має товщину  $d_p$  (рис. 1). З боку утвореного вогнезахисного покриття на межі розділу  $x_2$  здійснюється конвективно-радіаційний теплообмін від гарячих газів у вогневій печі. У представленій фізичній моделі нагрівання вогнезахищеної системи у вигляді двошарової пластини розглядається половина шару сталі ( $d_a/2$ ), оскільки в умовах випробувань на вогнестійкість, як правило, здійснюється чотирьохстороннє нагрівання сталеві конструкції. Внаслідок цього з не обігрівної поверхні на межі  $x=0$  (рис. 1) приймається умова симетрії температурної кривої, що є еквівалентом відсутності теплового потоку ліворуч.

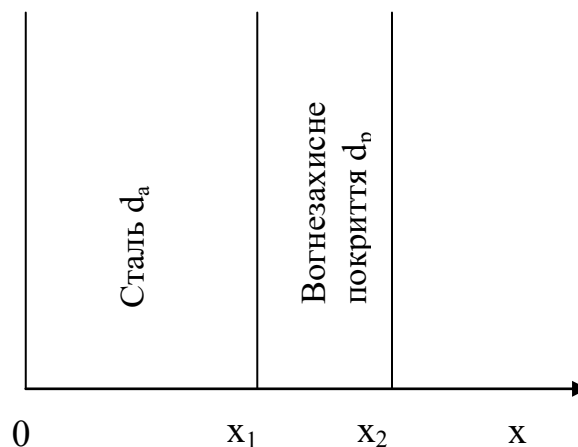


Рис. 1. Геометрична схема сталеві конструкції товщиною  $d_a$  з вогнезахисним покриттям товщиною  $d_p$

Математична модель процесу теплопровідності в такій двошаровій системі в декартовій системі координат представляє собою одновимірне рівняння теплопровідності із граничними умовами III-го роду на межі  $x=x_2=d_a/2+d_p$  (обігрівна поверхня) та рівністю нулю теплового потоку на межі  $x=0$  (необігрівна поверхня). Розподіл температури  $\theta$  у вогнезахищеній сталевій конструкції описується системою рівнянь (1)–(6) [13–14]:

$$c_v(x, t) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(x, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad (1)$$

$$0 < x < x_2; T = T(x, t), \quad (2)$$

– початкова умова:  $\theta_p(x, 0) = \theta_0$ ,

– гранична умова на обігрівній поверхні вогнезахисного покриття, при  $x = d_p$  :

$$\lambda_c \frac{\partial T(x_2, t)}{\partial x} + \alpha^* (T_s(t) - T(x, t)) = 0; \quad (3)$$

$$\alpha^* = \alpha_c + \Phi \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \left[ (\theta_{g,t} + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right] / (\theta_{g,t} - \theta_m), \quad (4)$$

де гранична умова на внутрішній поверхні вогнезахисного покриття, при  $x=0$ :

$$\lambda_p \frac{\partial Q_p}{\partial x} = C_a \cdot \rho \frac{V}{A_p} \cdot \frac{\partial Q_p}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\theta_a(t) = \theta_p(0, t), \quad (6)$$

де  $x$  – координата в вогнезахисному покритті ( $x=0$  відповідає місцю контакту вогнезахисного покриття зі сталеву конструкцією), м;  $t$  – час, с;  $t_{fi,requ}$  – час, який відповідає нормованій межі вогнестійкості;  $\alpha_c$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією на обігрівній поверхні вогнезахисного покриття: для стандартного температурного режиму  $\alpha_c=25$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C), для температурного режиму вуглеводневої пожежі  $\alpha_c=50$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\alpha^*$  – сумарний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією та тепловою радіацією на обігрівній поверхні вогнезахисного покриття;  $\Phi$  – кутовий коефіцієнт,  $\Phi=1,0$ ;  $\varepsilon_m$  – коефіцієнт теплового випромінювання обігрівної поверхні вогнезахисного покриття,  $\varepsilon_m=0,5$ ;  $\varepsilon_f$  – коефіцієнт теплового випромінювання полум'я,  $\varepsilon_f=1,0$ ;  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана,  $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C<sup>4</sup>);  $\theta_a$  – температура сталі, °C;  $\theta_{g,t}$  – температура газового середовища в момент часу  $t$ , яка змінюється за встановленим температурним режимом пожежі, °C;  $\theta_m$  – температура обігрівної поверхні вогнезахисного покриття, °C;  $\theta_0$  – початкова температура,  $\theta_0=20$  °C;  $\theta_p$  – температура вогнезахисного покриття, °C;  $\lambda_p$  – теплопровідність вогнезахисного покриття, Вт/(м·°C);  $c_a$  – питома теплоємність сталі, Дж/(кг·°C);  $c_p$  – питома теплоємність вогнезахисного покриття, Дж/(кг·°C);  $\lambda_p$  – густина вогнезахисного покриття,  $\lambda_p=1420$  кг/м<sup>3</sup> (дані виробника);  $\lambda_a$  – густина сталі,  $\lambda_a=7850$  кг/м<sup>3</sup>;  $A_p/V$  – коефіцієнт перерізу захищеної сталеву конструкції, м<sup>-1</sup>.

Аналітично-чисельний розв'язок такої моделі відносно температури на вогнезахищеній сталевій конструкції представлений виразом:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p c_a \rho_a (1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t}, \quad (7)$$

при  $\Delta\theta_{a,t} \geq 0$ , якщо при  $\Delta\theta_{g,t} > 0$ , а  $\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V$ .

За даними вимірювань температури  $\theta_a(0)$  при випробуваннях зразків вогнезахищених сталевих конструкцій та розрахованих температур  $\theta_p(0)$  знаходяться методом найменших квадратів значення  $\lambda_p$  і  $c_p$ . Для цих значень величина середньоквадратичного відхилення  $F$  розрахованих  $\theta_p(0)$  і експериментальних  $\theta_a(0)$  значень температур на вогнезахищеній сталевій стінці з не обігрівної поверхні в точці  $x=0$  буде мінімальною для всіх зразків, що піддавалися випробуванням:

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n [\theta_p^{j,i}(0,t) - \theta_a^{j,i}]^2}{\sum_{j=1}^m n_j}}, \quad (8)$$

де  $j=1,2,\dots,m$ ;  $j$ -номер зразка, що випробовується,  $m$  – загальна кількість зразків;  $n_j$  – кількість експериментальних значень температури  $\theta_a^{j,i}$ , що використовуються в формулі (8), для кожного зразка з номером  $j$  ( $j=1,2,\dots,m$ ).

Для визначення залежності коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_p$  і питомої об'ємної теплоємності  $C_v$  вогнезахисного покриття від температури пропонується використовувати метод розв'язання оберненої задачі теплопровідності, що заснований на ітераційному методі Ньютона–Гауса пошуку мінімуму функції  $F$  і методу регуляризації Тихонова О. М.

При розв'язанні оберненої задачі теплопровідності вказаним методом розглядається сплайн-апроксимація теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття нульового, першого і третього порядків. На першому кроці проводиться пошук  $\lambda_p$  і  $C_v$  вогнезахисних покриттів як постійних величин (константи). Значення знайдених констант використовують в якості нульового наближення для наступного кроку, на якому проводять пошук  $C_v$  як константи, а для  $\lambda_p$  застосовують сплайн-апроксимацію першого порядку з двома вузловими точками по температурі. Отримане рішення використовують в якості нульового наближення для третього кроку, на якому проводять пошук  $C_v$  як константи, а для  $\lambda_p$  застосовують сплайн-апроксимацію з трьома вузловими точками по температурі. Збільшення кількості вузлових точок для цієї сплайн-апроксимації  $\lambda_p$  виконують до кроку, на якому відхилення  $F$  в подальшому не зменшується. При наступних кроках застосовують сплайн-апроксимацію першого порядку і для питомої теплоємності  $C_v$  і таку ж процедуру визначення кількості вузлів її сплайн-апроксимації, як і для  $\lambda_p$ . Надалі, при необхідності, використовують сплайн-апроксимацію теплофізичних характеристик третього порядку. Розв'язання обернених задач теплопровідності

припиняють, якщо подальше збільшення кількості вузлових точок по температурі для сплайн-апроксимації теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття не призводить до зменшення відхилення  $F$ . Розв'язання з найменшим значенням відхилення  $F$  приймають в якості оптимального.

Залежності коефіцієнту теплопровідності і питомої об'ємної теплоємності (або її постійне значення) використовують для розрахунків значень мінімальної товщини вогнезахисного покриття. При цьому, значення мінімальної товщини визначається розв'язанням серії прямих задач теплопровідності за (1)–(6). Доцільно це розв'язання проводити методом кінцевих різниць по неявній схемі апроксимації за допомогою розробленої фізичної моделі системи «сталева конструкція – вогнезахисне покриття» (рис. 2).

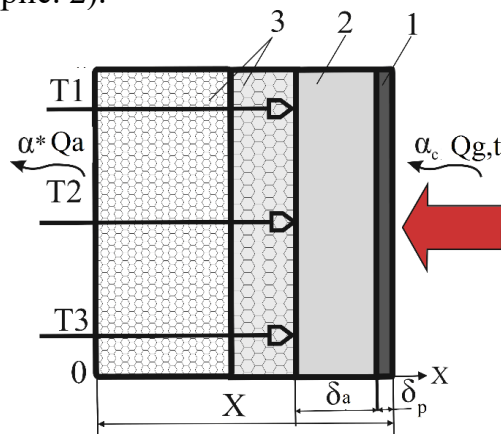


Рис. 2. Фізична модель теплового стану в системі «вогнезахисне покриття – сталева пластина – теплоізоляція»: 1 – вогнезахисне покриття; 2 – сталева пластина; 3 – 2 шари теплоізоляційного матеріалу

Зазначена фізична і математична моделі враховують те, що обігрівна поверхня вогнезахисного покриття нагрівається конвективно-радіаційним механізмом від гарячих газів в печі з температурою  $\theta_{g,t}$ . Усередині системи «вогнезахисне покриття – сталева пластина – теплоізоляція» тепло передається теплопровідністю. Приймається умова ідеального теплового контакту між шарами системи. З необігрівної поверхні теплоізоляції теплообмін відбувається шляхом конвекції [14].

## 5. Розробка методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій і алгоритму застосування

Розроблений розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій передбачає наступні етапи (рис. 3):

1. Проведення випробувань на вогнестійкість вогнезахисних сталевих конструкцій або експериментів з визначення температури необігрівної поверхні зменшених зразків вогнезахисних сталевих конструкцій при визначених умовах випробувань (температурні режими пожежі: стандартної, вуглеводневої, зовнішньої, тунельної, реальної) залежно від умов експлуатації вогнезахисної конструкції. Також обґрунтовуються товщини сталевих конструкцій чи зразків зменшених розмірів та товщини вогнезахисного покриття.

2. Побудова математичної, фізичної, геометричної та комп'ютерної моделей процесів, що відбуваються у досліджуваній вогнезахисній сталевій конструкції при випробуванні на вогнестійкість у визначених умовах випробувань.

3. На основі отриманих в результаті випробувань на вогнестійкість даних (температури в печі, температури на зразках конструкції, що випробовуються),

визначаються теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття (коефіцієнт теплопровідності, питома об'ємна теплоємність) шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності.

4. Визначення характеристики вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття – залежності мінімальної товщини покриття від приведеної товщини сталеві конструкції, тривалості вогневого впливу та значення критичної температури сталі, шляхом розв'язання прямих задач теплопровідності.



Рис. 3. Розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисених сталевих конструкцій і алгоритм його застосування

Відмінністю розробленого розрахунково-експериментального методу (рис. 3) від існуючих методів є те, що розроблений метод є більш універсальним та точним методом у порівнянні з експериментальним або розрахунковим методами. Він дозволяє за результатами одного або декількох випробувань на вогнестійкість (експериментальна частина методу), використовуючи розроблені математичні, комп'ютерні, чисельні моделі (розрахункова частина методу) досліджувати фізичні процеси, що відбуваються в вогнезахисених сталевих конструкціях. При цьому, за допомогою розробленого методу можливо враховувати різні чинники, що впливають на вогнезахисені сталеві конструкції: температурні режими пожежі, при яких відбувається випробування на вогнестійкість; кліматичні фактори, які впливають на межу вогнестійкості конструкцій; теплофізичні характеристики сталевих конструкцій та покриттів для вогнезахисту сталевих конструкцій; адгезію вогнезахисних покриттів до поверхні, що захищається.



## 6. Перевірка працездатності розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій

Для перевірки працездатності розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій проведено аналіз результатів випробувань на вогнестійкість вогнезахисних сталевих колон двотаврового перерізу з подальшим чисельним моделюванням теплового стану колон в програмному середовищі FRIEND. На основі порівняння експериментальних та розрахункових даних зробили висновок про адекватність розробленого методу та допустимі області відхилення при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій з використанням такого методу [15–16].

Випробуванням піддавалися 2 сталеві колони двотаврового перерізу НЕВ 200 (приведена товщина 6,1 мм), висотою 2 м. Колони оброблялись вогнезахисною речовиною «Amotherm Steel Wb», після попереднього нанесення ґрунту ГФ-021. На кожному зразку розміщувалось три термомпари.

Вогнезахисну речовину наносили механізованим способом та вручну. Середня товщина покриття склала 2,927 мм. Експеримент проводився за температури повітря 27 °С, відносній вологості повітря 54 %. Середня товщина покриття із вогнезахисної речовини «Amotherm Steel Wb» становила (сухий стан без ґрунту) 2,928 мм на зразку № 1 та 2,925 мм – на зразку № 2.

Температурний режим в печі був відтворений згідно стандартного температурного режиму пожежі (рис. 4).

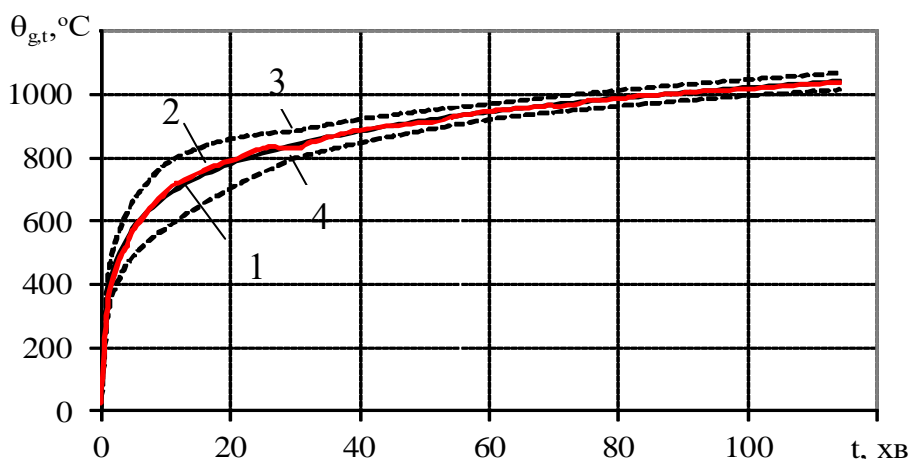


Рис. 4. Залежність температури в печі від тривалості вогневого впливу: 1 – крива стандартного температурного режиму, 2 – реальна крива зміни температури в печі; 3 – допустимі при випробуваннях максимальні значення температури в печі; 4 – допустимі при випробуваннях мінімальні значення температури в печі

Для випробувань використовувалась спеціальна випробувальна піч та метрологічні повірені засоби вимірювальної техніки.

Температурний режим пожежі визначався за формулою:

$$\Theta_g = 20 + 345 \lg(8t + 1), \quad (9)$$

де  $\Theta_g$  – температура газового середовища у протипожежному відсіку, °С;  $t$  – час, хв.

Залежність середніх температур зразків сталевих колон з досліджуваним вогнезахисним покриттям від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі показано на рис. 5.

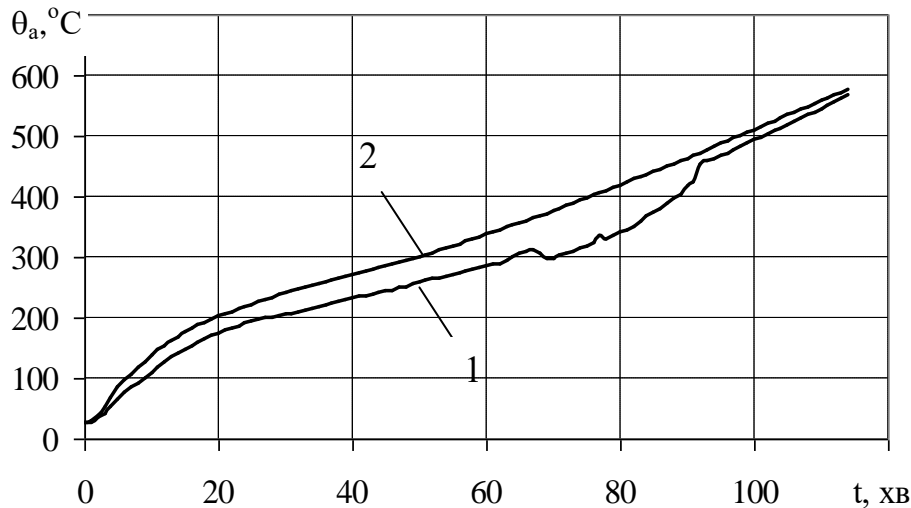


Рис. 5. Залежність середніх температур зразків вогнезахисних сталевих колон від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі: 1 – зразок колони № 1; 2 – зразок колони № 2

Наведені на рис. 5 температурні залежності порівнювались з результатами комп'ютерного моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної сталеві колони, виконані за допомогою програмного забезпечення FRIEND.

Теплофізичні характеристики досліджуваного вогнезахисного покриття для використання в розрахунках нестационарного прогріву вогнезахисної сталеві колони були визначені в [14]: коефіцієнт теплопровідності (рис. 6) і постійне значення питомої об'ємної теплоємності  $1 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>3</sup>·°С.

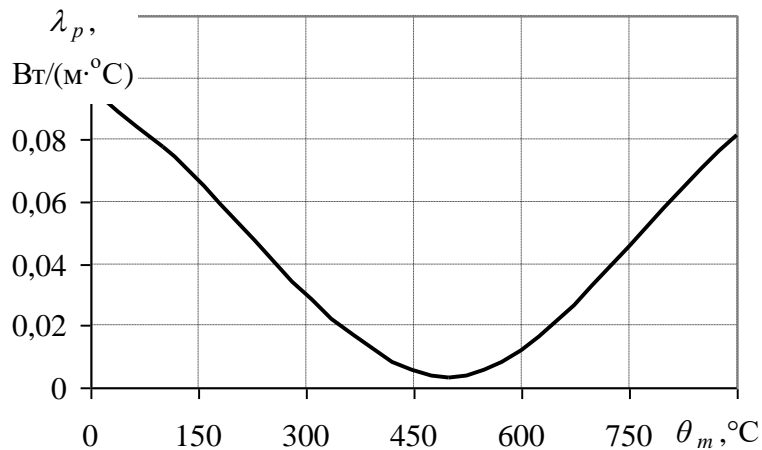


Рис. 6. Залежність ефективного коефіцієнту теплопровідності покриття «Amotherm Steel Wb» від температури, знайденого розв'язанням обернених задач теплопровідності

Комп'ютерна модель теплового стану досліджуваної вогнезахисної колони була побудована виходячи з того, що колона обігривається в печі з чотирьох боків однаково. Тому кожна поверхня колони розглядається як двошарова система, що складається з шару сталі та шару вогнезахисного покриття відповідної товщини. Така модель дозволяє розрахувати розподіл температур у всіх просторових точках шарів у часі і, зокрема, в точках розташування термопар не тільки за стандартним температурним режимом пожежі, а і за іншими альтернативними режимами пожежі.

Тому пропонується перевірку працездатності розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій проводити на зразках

зменшених розмірів у вигляді сталевих пластин, покритих з однієї поверхні реактивною вогнезахисною речовиною (рис. 7).

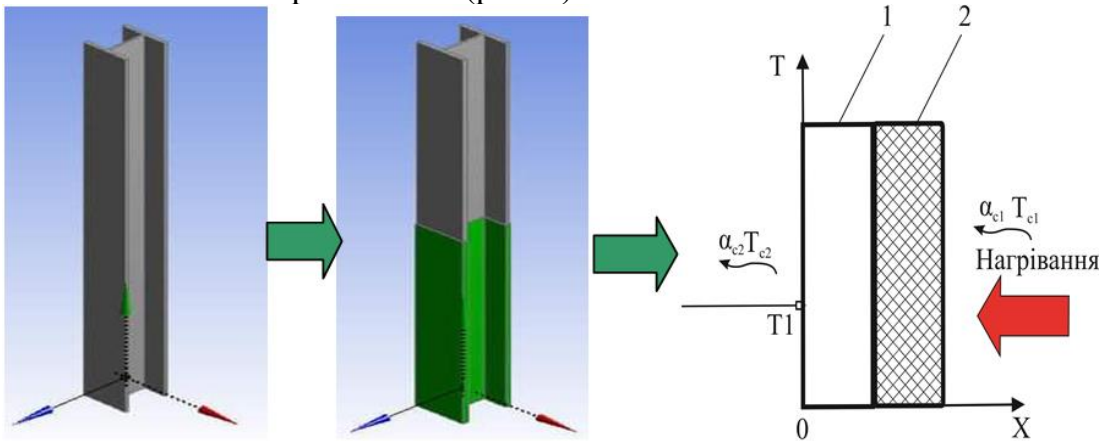


Рис. 7. Фізична модель вогнезахисної сталеві колони: 1 – сталеві конструкція; 2 – вогнезахисне покриття

Теплопровідність сталі  $\lambda_a$  та питому теплоємність сталі задавали згідно [17].

Коефіцієнт Пуассона сталі  $\nu=0,3$ , модуль пружності  $E_s=2,1 \cdot 10^5$  МПа.

Кількість вузлів чисельної моделі становило 15 вузлів по просторовій координаті з кроком по часу 60 сек.

В результаті чисельного моделювання розв'язанням прямих задач теплопровідності були отримані розрахункові значення прогріву вогнезахисної сталеві колони, які зображено на рис. 8.

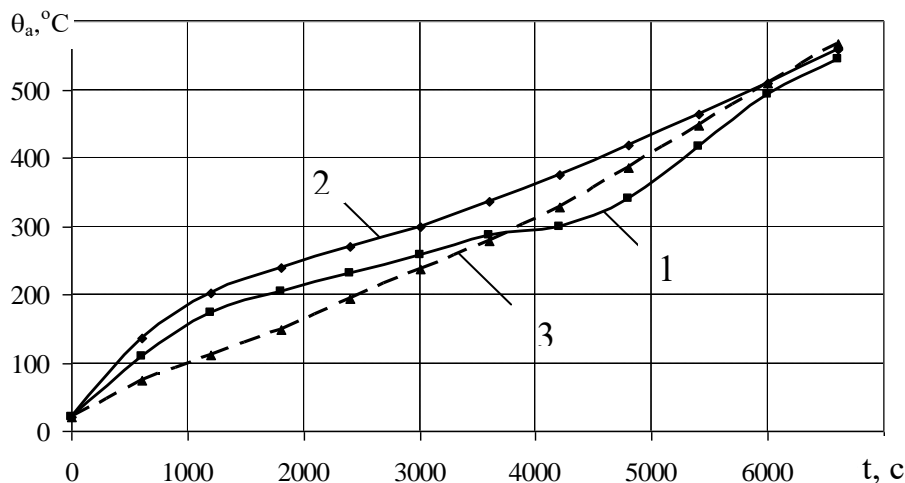
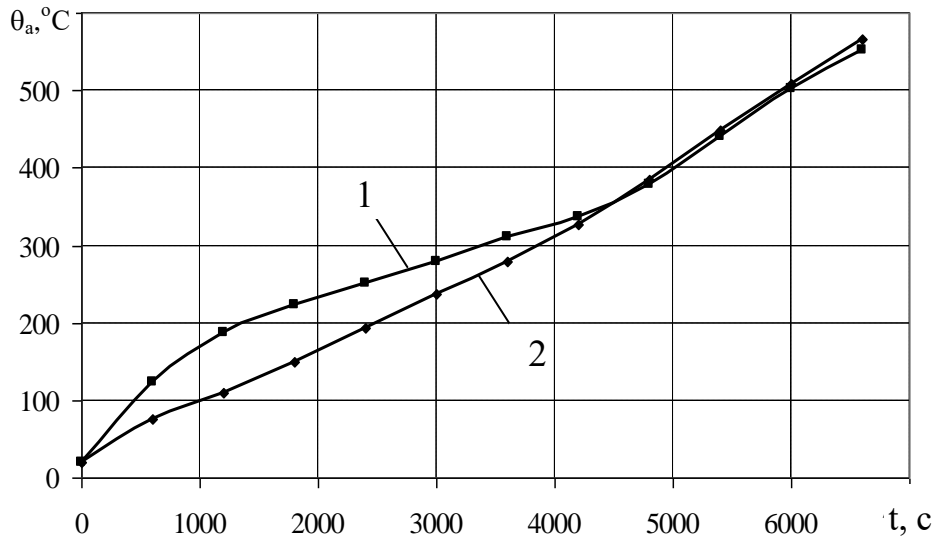


Рис. 8. Залежність температури вогнезахисних сталевих колон від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі: 1 – експериментальна крива прогріву колони № 1; 2 – експериментальна крива прогріву колони № 2; 3 – крива, розрахована в результаті чисельного моделювання

Як видно із рис. 8, розрахована в результаті чисельного моделювання крива залежності температури прогріву вогнезахисної сталеві колони від часу вогневого впливу співпадає з експериментальними кривими. При цьому встановлено, що найкращу збіжність і, відповідно, найменшу допустиму область відхилення мають залежності температури колони №1 з температурами, які розраховані в результаті чисельного моделювання. Так, найбільша похибка у вимірюванні температур спостерігається на 20 хвилині розрахунку і становить  $63^{\circ}\text{C}$ . При порівнянні результатів чисельного моделювання з результатами випробувань на вогнестій-

кість вогнезахищеної колони №2 така похибка на 20 хвилині склала  $92^{\circ}\text{C}$ . Можна зробити висновок, що при використанні результатів випробувань на вогнестійкість вогнезахищених сталевих колон за стандартним температурним режимом пожежі необхідно брати середнє значення результатів випробувань двох сталевих колон. В подальшому для порівняння використовувалися результати усереднених значень прогріву двох вогнезахищених сталевих колон (рис. 9).



**Рис. 9. Залежність середньої температури вогнезахищених сталевих колон №1 і №2 від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі: 1 – експериментальна крива прогріву колон №1 і №2; 2 – крива, розрахована в результаті чисельного моделювання**

Із рис. 9 випливає, що експериментальна крива усереднених значень температури вогнезахищених сталевих колон №1 і №2 і крива, розрахована в результаті чисельного моделювання, мають задовільну збіжність. Все це вказує на правильність задавання початкових та граничних умов, побудови математичної та фізичної моделей теплових процесів в системі «сталева конструкція – вогнезахисне покриття». В кінцевому випадку доводить працездатність розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій та адекватність реальним процесам, що відбуваються при нагріванні вогнезахищених сталевих колон без прикладення навантаження в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму пожежі.

## **7. Обговорення результатів розробки методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій**

Мета роботи вирішувалась шляхом розробки розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій. Отримані в результаті виконання роботи результати можуть використовуватись при визначенні вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій. При цьому застосовано алгоритм, що включає експериментальні та розрахункові процедури. Експериментальні процедури передбачають дослідження нестационарного прогріву вогнезахищених сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу за заданими режимами пожежі (стандартний, зовнішньої, вуглеводневої, тунельної, реальної пожежі) та врахування факторів кліматичного впливу. Розрахункові процедури передбачають побудову математичної, фізичної, геометричної, комп'ютерної моделей процесів, що

відбуваються у досліджуваній вогнезахищеній сталевій конструкції, ідентифікацію теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття (коефіцієнт теплопровідності, питома об'ємна теплоємність) шляхом розв'язання обернених задач теплопровідності та визначення характеристики вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття шляхом розв'язання прямих задач теплопровідності. Отримані результати можуть пояснюватися правильністю задавання початкових та граничних умов, адекватністю розроблених математичної та фізичної моделі, задовільною збіжністю експериментальних та розрахункових температур. Особливістю розробленого розрахунково-експериментального методу є більша універсальність та точність у порівнянні з експериментальним або розрахунковим методами. Він дозволяє за результатами одного або декількох випробувань на вогнестійкість (експериментальна частина методу), використовуючи розроблені математичні, комп'ютерні, чисельні моделі (розрахункова частина методу) досліджувати фізичні процеси, що відбуваються в вогнезахищених сталевих конструкціях. При цьому, за допомогою розробленого методу можливо враховувати різні чинники, що впливають на вогнезахищені сталеві конструкції: температурні режими пожежі, при яких відбувається випробування на вогнестійкість; кліматичні фактори, які впливають на межу вогнестійкості конструкцій; теплофізичні характеристики сталевих конструкцій та покриттів для вогнезахисту сталевих конструкцій; адгезія вогнезахисних покриттів до поверхні, що захищається. Даний метод використовується лише для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій. Як недолік слід відмітити обмеженість методу щодо оцінювання вогнестійкості вогнезахищених будівельних конструкцій, виконаних із інших матеріалів. В перспективі планується усунення цього недоліку шляхом розробки методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних конструкцій. Розвиток даного дослідження може полягати у розробці універсального методу, який би враховував можливість оцінювання вогнестійкості при сумісній роботі як сталевих, так і залізобетонних вогнезахищених конструкцій. При цьому можливо зіткнутися з труднощами математичного характеру щодо формування початкових та граничних умов при побудові математичної моделі. А при побудові фізичної моделі нестационарного прогріву вогнезахищених сталевих і залізобетонних конструкцій при їх сумісній роботі можна зіткнутися з труднощами експериментального характеру.

## 8. Висновки

1. Розроблено фізичну та математичну моделі оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій. При цьому застосовано алгоритм, що включає експериментальні та розрахункові процедури при визначенні вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій. Сформульовані початкові та граничні умови при побудові зазначених моделей, які дозволяють з достатньою для інженерних розрахунків точністю прогнозувати вогнестійкість вогнезахищеної сталеві конструкції. Особливістю розроблених моделей є врахування теплофізичних характеристик сталевих конструкцій та вогнезахисних покриттів, а також врахування особливостей формування режимів пожежі.

2. На основі запропонованих фізичної та математичної моделей розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій. Метод засновано на використанні зразків зменшених розмірів, що полегшує процедуру визначення нормованих значень межі вог-

нестійкості. Структурно-логічна схема реалізації розробленого методу передбачає 9 блоків розташованих на 5 рівнях, пов'язаних логічними зв'язками, та включає експериментальну і розрахункову частини. При цьому експериментальна частина методу передбачає дослідження температури вогнезахищених сталевих пластин в умовах вогневого впливу за заданими режимами пожежі (стандартний, зовнішньої, вуглеводневої, тунельної, реальної пожежі) та врахування факторів кліматичного впливу на покриття. Розрахункова частина – побудову математичної, фізичної, геометричної, комп'ютерної моделей процесів, що відбуваються у досліджуваній вогнезахищеній сталевій конструкції, ідентифікацію теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття (коефіцієнт теплопровідності, питома об'ємна теплоємність) шляхом розв'язання обернених задач теплопровідності та визначення характеристики вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття шляхом розв'язання прямих задач теплопровідності.

3. Перевірено працездатність розробленого методу при оцінюванні вогнестійкості 2 вогнезахищених сталевих колон двотаврового перерізу НЕВ 200 висотою по 2 метри кожна з вогнезахисною речовиною «Amotherm Steel Wb». В результаті встановлено, що для точності оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій необхідно застосовувати усереднені значення температур двох вогнезахищених сталевих колон. При цьому спостерігається найкраща збіжність результатів експериментального та розрахункового визначення температури прогріву вогнезахищених сталевих колон, що складає не більше 10% від допустимої області відхилення. Підтверджена працездатність запропонованого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій та його адекватність реальним процесам при нестационарному прогріву вогнезахищених сталевих колон в умовах стандартного температурного режиму пожежі.

### Література

1. Novak S., Drizhd V., Dobrostan O., Maladyka L. Influence of testing samples' parameters on the results of evaluating the fireprotective capability of materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2(10). P. 35–42. doi: 10.15587/1729-4061.2019.164743
2. De Silva, D., Bilotta, A., Nigro, E.. Experimental investigation on steel elements protected with intumescent coating. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 205. P. 232–244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.223>
3. Nadjai A., Petrou K., Han S., Ali F. Performance of unprotected and protected cellular beams in fire conditions. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 105. P. 579–588. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.150
4. Garlińska U., Michalak P., Popielarczyk T. Szacowanie możliwości utraty nośności konstrukcji budowlanej w warunkach pożaru. *BITP*. 2015. Vol. 39. Is. 3. P. 59–66.
5. Džolev I., Cvetkovska M., Radonjanin V., Lađinović Đ., Laban M. Modelling approach of structural fire performance. In book of proceedings. Vol. 17.
6. Cirpici B. K., Wang Y. C., Rogers B. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire. *Fire Safety Journal*. 2016. Vol. 81. P. 74–84. doi: 10.1016/j.firesaf.2016.01.011
7. Gillet M., Perez L., Autrique L. A model based predictive tool for fire safety intumescent coatings design. *Fire Safety Journal*. 2019. Vol. 110. doi: 10.1016/j.firesaf.2019.102908

8. Morys M., Häßler D., Krüger S., Schartel B., Hothan S. Beyond the standard time-temperature curve: Assessment of intumescent coatings under standard and deviant temperature curves. *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 112. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.102951

9. Li G. Q., Han J., Lou G. B., Wang Y. C. Predicting intumescent coating protected steel temperature in fire using constant thermal conductivity. *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 98. P. 177–184. doi: 10.1016/j.tws.2015.03.008

10. Новак С. В., Круковський П. Г., Перепилиця М. С. Визначення розподілу температури у сталевих конструкціях в умовах вогневого впливу розрахунковими методами. *Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека*. 2016. Вип. 1. С. 9–15.

11. Kovalov A., Slovinsky V., Udianskyi M., Ponomarenko I., Anszczak M. Research of fireproof capability of coating for metal constructions using calculation-experimental method. In *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006 MSF. P. 3–10. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.3

12. Kovalov A. I., Otrosh Y. A., Vedula S., Danilin O. M., Kovalevska T. M. Parameters of fire-retardant coatings of steel constructions under the influence of climatic factors. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. Vol. 3. P. 46–53. doi: 10.29202/nvngu/2019-3/9

13. Kovalov A., Otrosh Y., Chernenko O., Zhuravskij M., Anszczak M. Modeling of non-stationary heating of steel plates with fire-protective coatings in ansys under the conditions of hydrocarbon fire temperature mode. In *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038 MSF. P. 514–523. Trans Tech Publications Ltd.

14. Ковальов А. І., Отрош Ю. А., Томенко В. І., Данілін О. М., Безугла Ю. С., Карпець К. М. Оцінювання вогнезахисної здатності реактивних покриттів сталевих конструкцій. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2020. № 2(32). С. 44–55.

15. Kolšek J., Češarek P. Performance-based fire modelling of intumescent painted steel structures and comparison to EC3. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. Vol. 104. P. 91–103. doi: 10.1016/j.jcsr.2014.10.008

16. Li G. Q., Han J., Wang Y. C. Constant effective thermal conductivity of intumescent coatings: Analysis of experimental results. *Journal of Fire Sciences*. 2017. Vol. 35(2). P. 132–155.

17. ENV 1993-1-2:2005. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2, general rules – Structural fire design.

*A. Kovalov<sup>1</sup>, PhD, Senior Researcher, Doctoral Student*

*Y. Otrosh<sup>2</sup>, DSc, Professor, Head of Department*

*V. Tomenko<sup>1</sup>, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*

*O. Pirogov<sup>2</sup>, PhD, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department*

*N. Morkovska<sup>3</sup>, PhD, Associate Professor of the Department*

<sup>1</sup>*Cherkassy Institute of Fire Safety of National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkassy, Ukraine*

<sup>2</sup>*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

<sup>3</sup>*Kharkiv National University of Municipal Economy named after O. M. Beketova*

## CALCULATION AND EXPERIMENTAL METHOD FOR ESTIMATING FIRE RESISTANCE OF FIREPROOF STEEL STRUCTURES

Physical and mathematical models for assessing the fire resistance of fire-resistant steel structures have been developed. An algorithm is used, which includes experimental and computational procedures in determining the fire resistance of fire-resistant steel structures. The initial and boundary conditions for the construction of these models are formulated, which allow to predict the fire resistance of the fire-resistant steel structure with sufficient accuracy for engineering calculations. The peculiarity of the developed models construction and Civil Engineering. DOI: 10.52363/2524-0226-2021-34-6

is taking into account the thermophysical characteristics of steel structures and fire-retardant coatings, the peculiarities of the formation of fire regimes. Based on the proposed physical and mathematical models, a computational and experimental method for estimating the fire resistance of fire-resistant steel structures has been developed. The adequacy of the developed method was checked when assessing the fire resistance of a fire-retardant steel column. A computer model of a fire-retardant steel column was built to simulate non-stationary heating of such a system in the FRIEND software package. The results of determining the convergence of experimental data on the duration of fire exposure at the standard temperature to reach the critical temperature of steel with the results of numerical simulations in the software package FRIEND. Based on the comparison of the experimental results and numerical simulations, a conclusion is made about the adequacy of the developed model to the real processes that occur when heating fire-retardant steel columns without applying a load under fire conditions at standard fire temperature.

**Keywords:** fire resistance, fire resistance assessment method, fire protection, building constructions, fire-retardant ability, fire temperature regimes

## References

1. Novak, S., Drizhd, V., Dobrostan, O., Maladyka, L. (2019). Influence of testing samples' parameters on the results of evaluating the fireprotective capability of materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10), 35–42. doi: 10.15587/1729-4061.2019.164743
2. De Silva, D., Bilotta, A., Nigro, E. (2019). Experimental investigation on steel elements protected with intumescent coating. *Construction and Building Materials*, 205, 232–244. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.223
3. Nadjai, A., Petrou, K., Han, S., Ali, F. (2016). Performance of unprotected and protected cellular beams in fire conditions. *Construction and Building Materials*, 105, 579–588. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.150
4. Garlińska, U., Michalak, P., Popielarczyk, T. (2015). Szacowanie możliwości utraty nośności konstrukcji budowlanej w warunkach pożaru. *BITP*, 39, Is. 3, 59–66.
5. Džolev, I., Cvetkovska, M., Radonjanin, V., Lađinović, Đ., Laban, M. Modeling approach of structural fire performance. In book of proceedings (Vol. 17).
6. Cirpici, B. K., Wang, Y. C., Rogers, B. (2016). Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire. *Fire Safety Journal*, 81, 74–84. doi: 10.1016/j.firesaf.2016.01.011
7. Gillet, M., Perez, L., Autrique, L. (2019). A model based predictive tool for fire safety intumescent coatings design. *Fire Safety Journal*, 110. doi: 10.1016/j.firesaf.2019.102908
8. Morys, M., Häbler, D., Krüger, S., Schartel, B., Hothan, S. (2020). Beyond the standard time-temperature curve: Assessment of intumescent coatings under standard and deviant temperature curves. *Fire Safety Journal*, 112. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.102951
9. Li, G. Q., Han, J., Lou, G. B., Wang, Y. C. (2016). Predicting intumescent coating protected steel temperature in fire using constant thermal conductivity. *Thin-Walled Structures*, 98, 177–184. doi: 10.1016/j.tws.2015.03.008
10. Novak, S. V., Krukovskyi, P. H., Perepylytsia, M. S. (2016). Vyznachennia rozpodilu temperatury u stalevykh konstruktsiiakh v umovakh vohnevoho vplyvu rozrakhunkovymy metodamy. *Naukovyi visnyk: tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1, 9–15.
11. Kovalov, A., Slovinskyi, V., Udianskyi, M., Ponomarenko, I., Anszczak, M. (2020). Research of fireproof capability of coating for metal constructions using calculation-experimental method. In *Materials Science Forum*. 1006 MSF, 3–10. Trans Tech Publications Ltd. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.3



12. Kovalov, A. I., Otrosh, Y. A., Vedula, S., Danilin, O. M., Kovalevska, T. M. (2019). Parameters of fire-retardant coatings of steel constructions under the influence of climatic factors. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2019, 3, 46–53. doi: 10.29202/nvngu/2019-3/9

13. Kovalov, A., Otrosh, Y., Chernenko, O., Zhuravskij, M., Anszczak, M. (2021). Modeling of non-stationary heating of steel plates with fire-protective coatings in ansys under the conditions of hydrocarbon fire temperature mode. In *Materials Science Forum*. 1038 MSF, 514–523. Trans Tech Publications Ltd.

14. Kovalov, A. I., Otrosh, Yu. A., Tomenko, V. I., Danilin, O. M., Bezuhla, Yu. S. Karpets K. M. (2020). Otsiniuvannia vohnezakhysnoi zdatnosti reaktyvnykh pokryttiv stalevykh konstruksii. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 2 (32), 44–55.

15. Kolšek, J., Češarek, P. (2015). Performance-based fire modelling of intumescent painted steel structures and comparison to EC3. *Journal of Constructional Steel Research*, 104, 91–103. doi: 10.1016/j.jcsr.2014.10.008

16. Li, G. Q., Han, J., Wang, Y. C. (2017). Constant effective thermal conductivity of intumescent coatings: Analysis of experimental results. *Journal of Fire Sciences*, 35(2), 132–155.

17. ENV 1993-1-2:2005. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2, general rules – Structural fire design.

Надійшла до редколегії: 06.10.2021

Прийнята до друку: 15.11.2021