

УДК 614.841.332

<https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-149-158>

А. І. Ковальов
Ю. А. Отрош
В. І. Томенко
А. В. Кондратьєв

ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Мета. Розробка моделей теплового стану вогнезахисної сталеві колони для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій за допомогою розробленого розрахунково-експериментального методу.

Методи. Метод кінцевих різниць, метод полігонних вогневих випробувань, математичне та комп'ютерне моделювання процесів нестационарного теплообміну, визначення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів на основі розв'язання прямих і обернених задач теплопровідності.

Результати. Розроблено геометричну, фізичну, комп'ютерну моделі, за допомогою яких здійснено оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій розрахунково-експериментальним методом. Проведено перевірку адекватності розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисної двотаврової сталеві колони. Проведено аналіз випробувань на вогнестійкість вогнезахисних сталевих колон, що піддавалися впливу пожежі за стандартним температурним режимом пожежі без прикладеного до них навантаження. Побудовано комп'ютерну модель системи «сталеві колони – реактивне вогнезахисне покриття» для чисельного моделювання нестационарного прогріву такої системи. Проведено оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих колон двотавровою перерізу без прикладеного до них навантаження за допомогою розрахунково-експериментального методу. Проведено верифікацію результатів експериментальних досліджень з результатами чисельного моделювання. Встановлено збіжність результатів експериментальних даних щодо тривалості вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі до досягнення критичної температури сталі з результатами чисельного моделювання. Підтверджена працездатність запропонованого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій.

Наукова новизна. Вперше розроблені моделі теплового стану вогнезахисної сталеві колони, за допомогою яких проведено оцінювання вогнестійкості і підтверджена адекватність розроблених моделей реальним процесам, що відбуваються при нагріванні вогнезахисних сталевих колон без прикладення навантаження в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму пожежі.

Практична значимість. Полягає у реалізації та впровадженні результатів роботи на об'єктах різного призначення при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій шляхом оцінювання ефективності вогнезахисних покриттів сталевих будівельних конструкцій.

Ключові слова: вогнестійкість, метод оцінювання вогнестійкості, вогнезахист, вогнезахисна здатність, вогнезахисні покриття, сталеві конструкції.

Вступ.

Не дивлячись на технічний прогрес у будівництві та технологіях протидії пожежам, останні не стали менш небезпечними. Пожежі забирають тисячі життів, а також призводять до мільярдних збитків. Близько 51 % всіх пожеж в країнах світу виникають у будівлях і спорудах та на транспорті. При цьому в приміщеннях гине 90 % від всіх жертв на пожежах.

Наведені чинники створюють потребу в захисті людини від впливу окреслених загроз. При цьому одним з найбільш небезпечних чинників є пожежі в приміщеннях будівель та споруд. Забезпечення безпеки людей і матеріальних цінностей необхідно виконувати з урахуванням усіх стадій життєвого циклу об'єктів, таких як науковий супровід та

моніторинг, проектування, будівництво, експлуатація, а також виключати виникнення пожеж. Запобігти виникненню пожежі дозволяють технічні засоби та організаційні заходи, за яких ймовірність виникнення та розвитку пожежі не перевищує унормованого допустимого значення. Умовою зниження незворотних наслідків пожеж на об'єктах різного призначення є збереження несучої здатності будівельних, конструкцій технологічних споруд і комунікацій.

Зазначені вимоги стійкості забезпечуються комплексом заходів, що передбачаються як технологією виробництва, так і застосуванням ефективних вогнезахисних покриттів для вогнезахисту будівельних конструкцій.

Тому в умовах глобалізації та збільшення загроз для людини перше місце відіграє саме збереження стійкості будівель та споруд в умовах пожеж та інших стихійних лих, а також збереження їх функціонального призначення після таких впливів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Питаннями оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій займалися та займаються багато відомих вчених. В [1] авторами розроблено дві моделі сталеві балки за допомогою програм ANSYS та OpenSEES, які враховують постійне механічне навантаження та вплив температурного режиму пожежі, проте не враховують наявність систем вогнезахисту та їхній вплив на точність моделювання. Автори у [2] 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 роботі [3] представлені результати випробування на вогнестійкість незахищених сталевих балок порівняно з простими та удосконаленими методами розрахунку, наведеними в EN 1993-1-2. Результати показали різницю між експериментальними та розрахунковими значеннями температури, отриманими при аналізі FEM. У [4] представлено метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних реактивними вогнезахисними покриттями сталевих конструкцій. Метод можливо використовувати для прогнозування поведінки вогнезахисної сталеві конструкції в різних умовах (зміна коефіцієнта перерізу сталі, товщини покриття і виду пожежного впливу). Проте відсутні достовірні дані щодо універсальності використання методу, в тому числі для пасивних вогнезахисних покриттів та впливу кліматичних факторів. В [5] 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. У [6] 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, не в повній мірі були досліджені питання впливу температурних режимів пожежі на точність оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій.

Проведений аналіз дає змогу констатувати тенденцію щодо поширення застосування розрахунково-експериментального методу для оцінювання меж вогнестійкості вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій та вогнезахисної здатності покриттів для таких конструкцій. Цей метод дозволяє враховувати значення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів не тільки як постійні значення, а і як функції від температури. Це дозволяє підвищити точність методу та враховувати процеси теплообміну у вогнезахисній сталевій конструкції в умовах впливу різних температурних режимів пожежі.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми є відсутність ефективних методів щодо оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами систем вогнезахисту у вигляді як реактивних, так і пасивних вогнезахисних покриттів. Розв'язання даної проблеми призведе до підвищення точності оцінювання вогнезахисних сталевих конструкцій з достатньою для інженерних розрахунків точністю з використанням результатів випробувань на вогнестійкість, що повністю корелюють з результатами чисельного моделювання в сучасних програмних комплексах.

Мета статті (постановка завдання).

Метою роботи є розробка моделей теплового стану вогнезахищеної сталевій колони для оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих конструкцій за допомогою розробленого розрахунково-експериментального методу.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні завдання:

– провести аналіз результатів випробувань на вогнестійкість вогнезахищених сталевих колон;

– побудувати фізичну, геометричну, комп'ютерну моделі нестационарного прогріву вогнезахищеної сталевій колони, в якій врахувати та побудувати:

- геометрію об'єкта, що досліджується;
- скінченно-елементну модель;

- задати теплові впливи на конструкцію;

– провести верифікацію результатів експериментальних даних з результатами чисельного моделювання.

Методи дослідження.

Випробуванням піддавалися 2 сталеві колони двотаврового перерізу НЕВ 200 (приведена товщина 6,1 мм), висотою по 2 метри кожна. Колони оброблялись реактивною вогнезахисною речовиною відомої італійської фірми після попереднього нанесення ґрунту ГФ-021. На кожному зразку розміщувалось три термопарні згідно з [7], як показано на рис. 1.

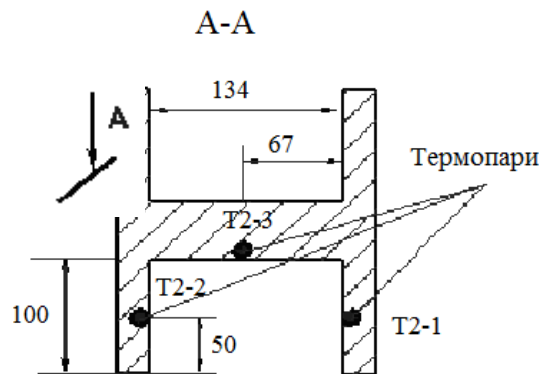
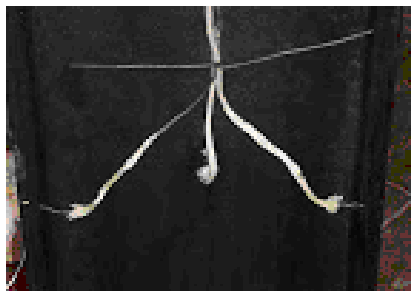


Рис. 1. Схема розташування термопар на зразках вогнезахищених сталевих колон: А-А – вид зверху.

Вогнезахисну речовину наносили механізованим способом та вручну. Середня товщина покриття складала 2,927 мм. Експеримент проводився за температури повітря 27°C, відносній вологості повітря 54 %. Середня товщина реактивного вогнезахисного покриття із вогнезахисної речовини становила (сухий стан без ґрунту) 2,928 мм на зразку № 1 та 2,925 мм – на зразку № 2. На рис. 2 показано види зразків в печі до (а) та після (б) проведення випробувань.

Значення об'ємного коефіцієнта спучення реактивного вогнезахисного покриття складало 38,3 см³/г (умовний лінійний коефіцієнт спучення 47,9).

Наведені на рис. 3 (криві 5,6) температурні залежності середніх температур зразків вогнезахищених сталевих колон від тривалості вогневого

впливу порівнювались з результатами комп'ютерного моделювання нестационарного прогріву вогнезахищеної сталевій колони, виконані за допомогою програмного забезпечення FRIEND.

З цими температурами було здійснено порівняння результатів комп'ютерного моделювання нестационарного прогріву вогнезахищеної сталевій колони, виконані за допомогою програмного забезпечення FRIEND. Для порівняння результатів моделювання з експериментальним визначенням температури сталевій колони у визначених місцях в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі брали значення температури зразка колони № 2 (рис. 3, крива 5), яка найбільше прогрілася в результаті випробування.

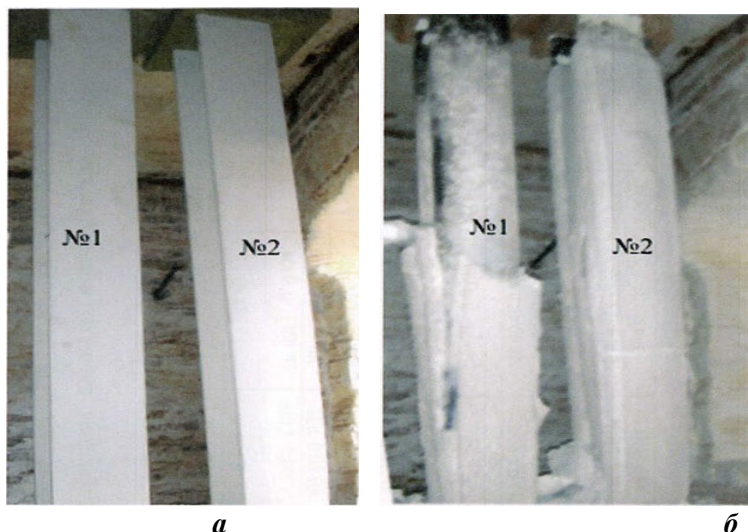


Рис. 2. Види зразків в печі до (а) та після (б) проведення випробувань.

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

Температурний режим в печі був відтворений згідно стандартного температурного режиму пожежі (рис. 3).

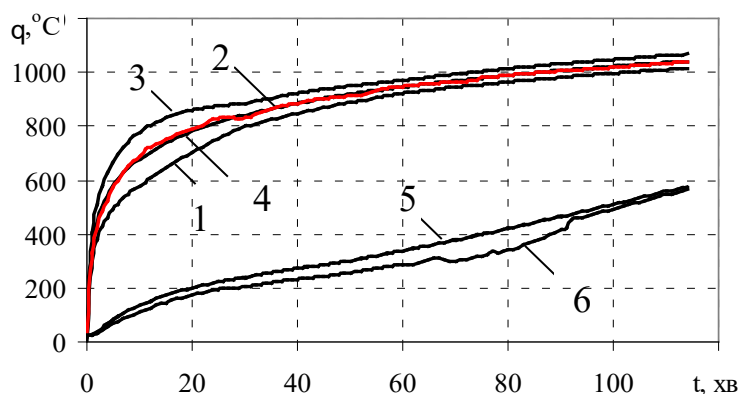


Рис. 3. Залежність температури в печі та середніх температур зразків вогнезахисних сталевих колон від тривалості вогневого впливу: 1 – крива стандартного температурного режиму, 2 – реальна крива зміни температури в печі; 3 – допустимі при випробуваннях максимальні значення температури в печі; 4 – допустимі при випробуваннях мінімальні значення температури в печі; 5 – зразок колони № 2; 6 – зразок колони № 1.

Побудова моделей нестационарного прогріву вогнезахисної сталеві колони.

Комп'ютерна модель теплового стану досліджуваної вогнезахисної колони була побудована виходячи з того, що колони обігрівається в печі з чотирьох боків однаково. Тому кожна поверхня колони розглядається як двошарова система: шар

сталі та шар реактивного 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 довільними режимами пожежі (рис. 4).

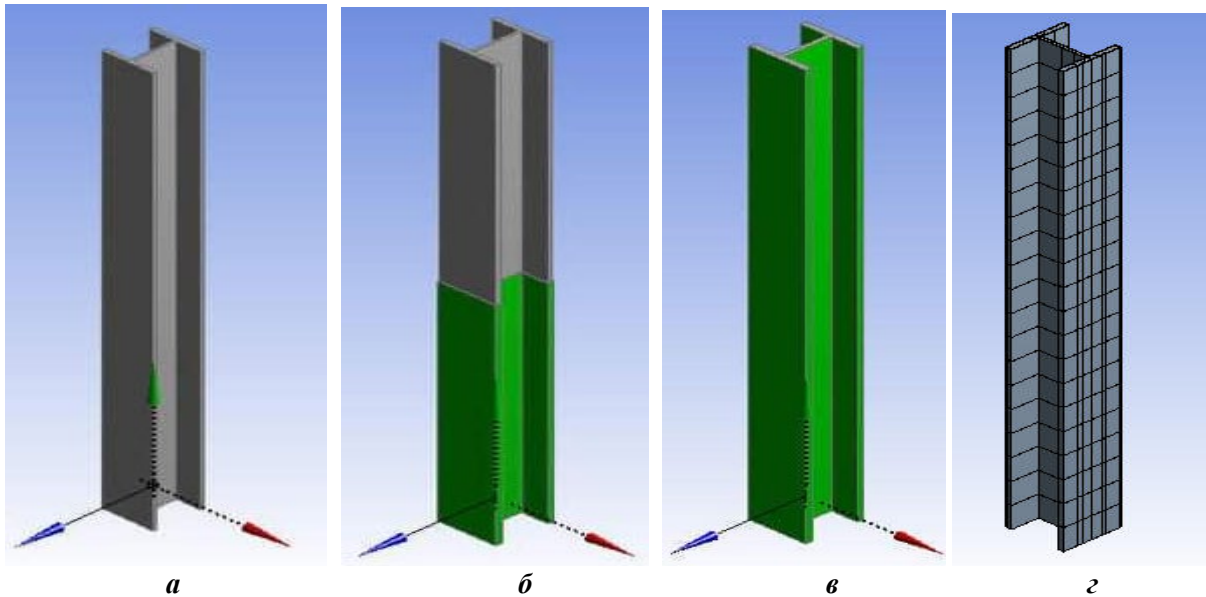


Рис. 4. Побудова геометричної (а, б, в) та скінченно-елементної моделі (z) вогнезахисної сталеві колони.

Розроблено фізичну модель системи «сталеві конструкція – вогнезахисне покриття» (рис. 5).

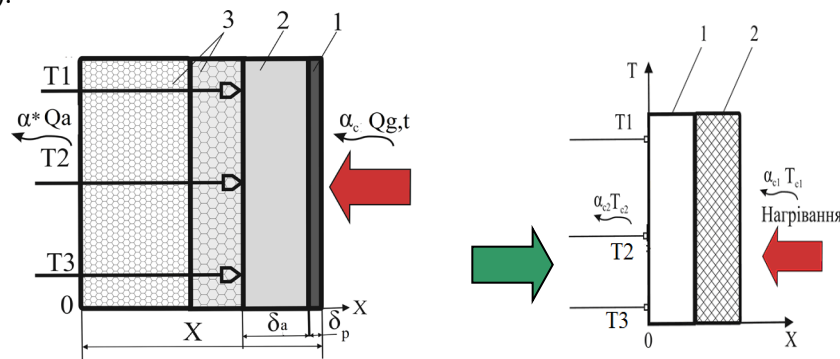


Рис. 5. Фізична модель теплового стану в системі «вогнезахисне покриття – сталеві пластина»: 1 – сталеві пластина; 2 – вогнезахисне покриття; 3 – теплоізоляція; T1-T3 – термовари; α_{c1} , α_c – коефіцієнт тепловіддачі з обігрівної поверхні; α_{c2} , α^* – коефіцієнт тепловіддачі з необігрівної поверхні; T_{c1} – температура в печі; T_{c2} – температура сталеві пластини; δ_a – товщина сталі; δ_p – товщина покриття.

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

Пропонується перевірку адекватності розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій проводити на зразках

зменшених розмірів у вигляді сталевих пластин, покритих з однієї поверхні реактивною вогнезахисною речовиною, що утворює на поверхні, що захищається, вогнезахисне покриття (рис. 6).

Перевірка адекватності розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій.

Теплофізичні характеристики досліджуваного вогнезахисного покриття для використання в розрахунках нестационарного прогріву вогнезахисної сталеві колони були визначені в [8]: коефіцієнт теплопровідності, що залежить

від температури і постійне значення питомої об'ємної теплоємності $10^5 \text{ Дж/м}^3 \cdot \text{°C}$.

Масову теплоємність вогнезахисного покриття задавали постійною величиною $70,4 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$; ε_m – коефіцієнт теплового випромінювання обігрівної поверхні покриття, $\varepsilon_m = 0,5$; σ – стала Стефана Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C}^4)$; θ_0 –

початкова температура, $\theta_0 = 20 \text{ °C}$; ρ_a – густина сталі, $\rho_a = 7850 \text{ кг/м}^3$; ρ_p – густина покриття, $\rho_p = 1420 \text{ кг/м}^3$ (дані виробника).

Геометричні розміри колони для моделювання її теплового стану наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Геометричні розміри сталеві колони НЕВ 200 для моделювання її нестационарного прогріву

Номінальна вага 1 м, [кг/м]	Розміри, [мм]					Площа поперечного перерізу А, [см ²]	Розміри для деталізації, [мм]				
	b	h	s	t	r		h ₁	d	Ø	e _{min}	e _{max}
61,3	200	200	9	15	18	78,1	170	134	27	100	100

Теплопровідність λ_a та питому теплоємність сталі c_a задавали згідно [9].

Кількість вузлів чисельної моделі становило 15 вузлів (10 вузлів для сталеві конструкції і 5 вузлів для вогнезахисного покриття) по просторовій координаті з кроком по часу 60 сек.

В результаті чисельного моделювання розв'язанням прямих задач теплопровідності були отримані розрахункові значення прогріву вогнезахисних сталевих колон № 1,2, які зображено на рис. 6,7.

Як видно із рис. 6, розрахована в результаті чисельного моделювання крива залежності температури прогріву вогнезахисної сталеві колони №2 від часу вогневого впливу співпадає з експериментальною кривою. При порівнянні результатів чисельного моделювання з результатами випробувань на вогнестійкість вогнезахисної колони №2 така похибка на 20 хвилині склала 92 °C .

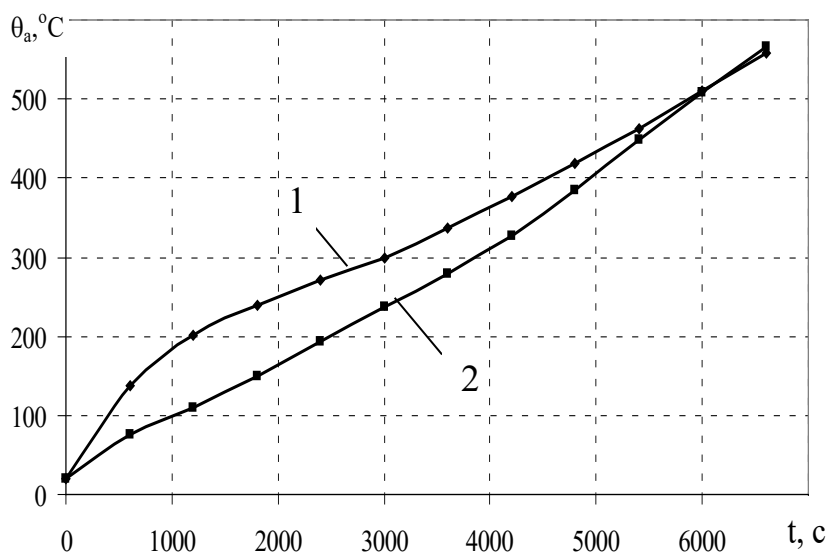


Рис. 6. Залежність температури вогнезахисної сталеві колони № 2 від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі: 1 – експериментальна крива; 2 – крива, розрахована в результаті чисельного моделювання.

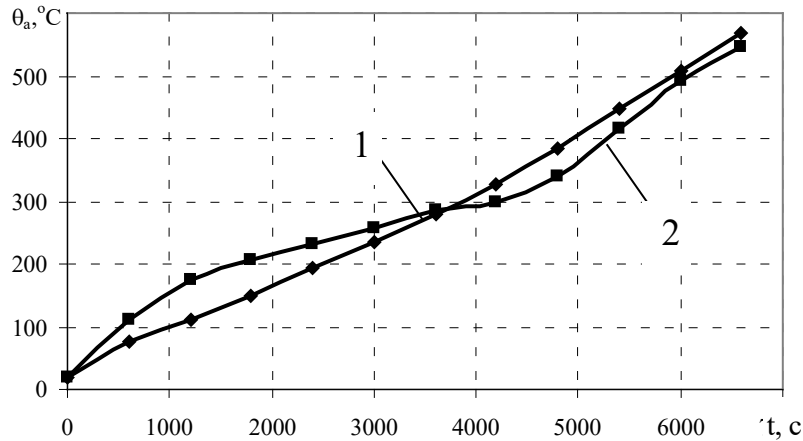


Рис. 7. Залежність температури вогнезахисної сталеві колони № 1 від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі: 1 – експериментальна крива; 2 – крива, розрахована в результаті чисельного моделювання.

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 (рис. 7). Так, найбільша похибка у вимірюванні температур спостерігається на 20 хвилині розрахунку і становить 63°C. Можна зробити висновок, що при використанні

результатів випробувань на вогнестійкість вогнезахисних 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 вогнезахисних сталевих колон, як показано на рис. 8.

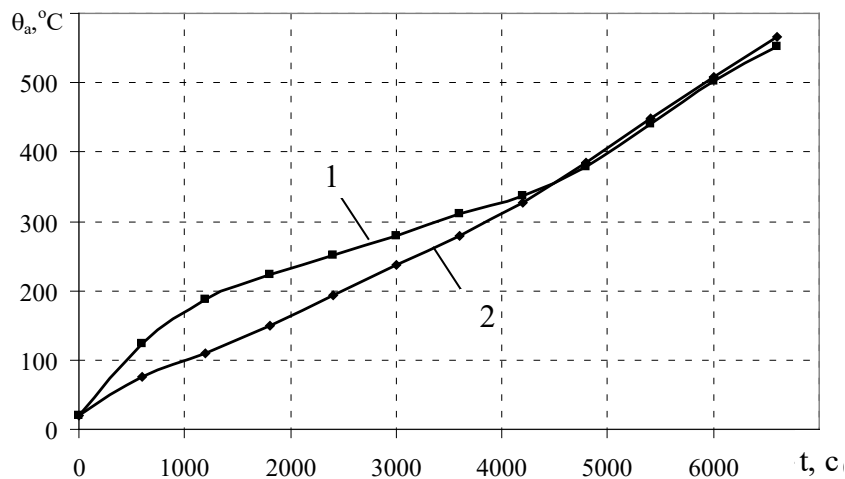


Рис. 8. Залежність середньої температури вогнезахисних сталевих колон №1 і №2 від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі: 1 – експериментальна крива прогріву колон №1 і №2; 2 – крива, розрахована в результаті чисельного моделювання.

Із рис. 8 випливає, що експериментальна крива усереднених значень температури вогнезахисних сталевих колон №1 і №2 і крива, розрахована в результаті чисельного моделювання, мають задовільну збіжність.

Результати експериментальних досліджень і чисельного аналізу в програмі FRIEND для часового відрізка 20–40 хвилин досить суттєво відрізняються у всіх контрольних точках, проте надалі ця відмінність стабілізується, і аж до закінчення

експерименту не перевищує 10%, що можна вважати прийнятним результатом. Все це вказує на правильність задавання початкових та граничних умов, побудови математичної та фізичної моделей теплових процесів в системі «сталеві конструкції – вогнезахисне покриття». В кінцевому випадку доводить працездатність розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій та адекватність реальним процесам, що відбуваються при нагріванні вогнезахисних сталевих колон без прикладення навантаження в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму пожежі.

Обговорення результатів.

Мета роботи вирішувалась шляхом оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій за допомогою розробленого розрахунково-експериментального методу. При оцінюванні застосовано алгоритм, що включає в себе експериментальні та розрахункові процедури. При використанні експериментальних процедур досліджували нестационарний прогрів вогнезахисних сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі. Розрахункові процедури включали в себе побудову математичної, фізичної, геометричної, комп'ютерної моделей процесів, що відбуваються у досліджуваній вогнезахисній сталевій конструкції, ідентифікацію теплофізичних характеристик реактивного вогнезахисного покриття (коефіцієнт теплопровідності, питома об'ємна теплоємність) шляхом розв'язання обернених задач теплопровідності. Отримані результати можуть пояснюватися правильністю задавання початкових та граничних умов, адекватністю розробленого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій, задовільною збіжністю експериментальних та розрахункових температур. Особливістю оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій є те, що задаються теплофізичні характеристики поверхні, що захищається (в нашому випадку сталь) та вогнезахисного покриття, що залежать від температури. Це дозволяє з більшою точністю підходити до

оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій за результатами одного або декількох випробувань на вогнестійкість та за допомогою розроблених математичної, комп'ютерної, чисельної моделей теплових процесів у досліджуваних конструкціях. За допомогою розробленого методу можливо оцінювати вогнестійкість і інших вогнезахисних будівельних конструкцій. При цьому необхідно задавати теплофізичні характеристики тих будівельних матеріалів, з яких виконано будівельні конструкції. Перспективним напрямком даного дослідження є розширення діапазону оцінювання вогнестійкості не тільки вогнезахисних сталевих конструкцій, а і інших конструкцій, виготовлених з залізобетону, бетону, дерева, сталезалізобетону шляхом врахування умов випробування, теплофізичних характеристик матеріалів, з яких виготовлено конструкцію. Розвиток даного дослідження може полягати у розробці універсального методу, який би враховував можливість оцінювання вогнестійкості всіх вогнезахисних будівельних конструкцій. При цьому можливо зіткнутися з труднощами математичного характеру щодо формування початкових та граничних умов при побудові математичної моделі.

Висновки.

1. Розроблено геометричну, фізичну, комп'ютерну та скінченно-елементну моделі оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій. Особливістю розроблених моделей є врахування теплофізичних характеристик сталевих конструкцій та вогнезахисних покриттів, що залежать від температури, а також врахування особливостей формування температурних режимів пожежі.

2. Проведено оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих колон двотаврового перерізу без прикладеного до них навантаження за допомогою розрахунково-експериментального методу.

3. Проведено верифікацію результатів експериментальних досліджень з результатами чисельного моделювання. При цьому встановлено, що найкращу збіжність і, відповідно, найменшу допустиму область відхилення мають залежності температури

прогріву колони №1 при випробуваннях на вогнестійкість з температурами, які розраховані в результаті чисельного моделювання. Так, найбільша похибка у вимірюванні температур спостерігається на 20 хвилині розрахунку і становить 63°C. При порівнянні результатів чисельного моделювання з результатами випробувань на вогнестійкість вогнезахисної колони №2 така похибка на 20 хвилині склала 92°C. Зроблено висновок, що при використанні результатів випробувань на вогнестійкість вогнезахисних сталевих колон за стандартним температурним режимом пожежі необхідно брати середнє значення результатів випробувань двох сталевих колон.

4. При цьому встановлено, що для точності оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій необхідно застосовувати усереднені значення температур двох вогнезахисних сталевих колон. При цьому спостерігається найкраща збіжність результатів експериментального та розрахункового визначення температури прогріву вогнезахисних сталевих колон, що складає не більше 10% від допустимої області відхилення.

5. Підтверджена працездатність запропонованого розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій та доведено його адекватність реальним процесам при нестационарному прогріву вогнезахисних сталевих колон в умовах стандартного температурного режиму пожежі.

Список літератури

1. Džolev I., Radujković A., Cvetkovska M., Ladinović Đ., & Radonjanin V. Fire analysis of a simply supported steel beam using Openses and Ansys Workbench. In *4th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering, Subotica*. 2016. Vol. 22. P. 315–322.
2. 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.
3. Łukomski M., Turkowski P., Roszkowski P., & Papis B. Fire Resistance of Unprotected Steel Beams-Comparison between Fire Tests and Calculation Models. In *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 172. P. 665–672. Elsevier Ltd.
4. 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.

5. Novak S., Drizhd V., Dobrostan O., & Maladyka. Influence of testing samples' parameters on the results of evaluating the fireprotective capability of materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2(10–98). P. 35–42.

6. 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.

7. Guzii S., Otrosh Y., Guzii O., Kovalov A., & Sotiriadis K. Determination of the fire-retardant efficiency of magnesite thermal insulating materials to protect metal structures from fire. In *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 524–530.

8. Kovalov A., Slovinskyi 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. P. 3–10.

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

References

1. Džolev, I., Radujković, A., Cvetkovska, M., Ladinović, Đ., & Radonjanin, V. (2016, April). Fire analysis of a simply supported steel beam using Openses and Ansys Workbench. In *4th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering, Subotica*, 22, 315–322.
2. 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. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.03.008>.
3. Łukomski, M., Turkowski, P., Roszkowski, P., & Papis, B. (2017). Fire Resistance of Unprotected Steel Beams-Comparison between Fire Tests and Calculation Models. In *Procedia Engineering*, 172, 665–672. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.078>.
4. 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. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.01.011>.
5. 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(10–98), 35–42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.164743>.
6. De Silva, D., Bilotta, A., & Nigro, E. (2019). Experimental investigation on steel elements protected with intumescent coating. *Construction and Building Materials*, 205, 232–244. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.223>.
7. Guzii, S., Otrosh, Y., Guzii, O., Kovalov, A., & Sotiriadis, K. (2021). Determination of the fire-retardant efficiency of magnesite thermal insulating materials to protect metal structures from fire. In *Materials Science Forum*, 1038, 524–530. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.524>.
8. Kovalov, A., Slovinskyi, 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.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.3>.

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

Надійшла до редакції 10.05.2021
Рецензент д-р. техн. наук., с.н.с. Юрій КЛЮЧКА

Ковальов Андрій Іванович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, докторант, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023).

E-mail: kovalev27051980@gmail.com

Отрош Юрій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, начальник кафедри, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023).

E-mail: otrosh@nuczu.edu.ua

Томенко Віталій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, (вул. Онопрієнка, 8; м. Черкаси, Україна, 18034).

E-mail: firech1996@gmail.com

Кондратьєв Андрій Валерійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, (вул. Маршала Бажанова, 17; м. Харків, Україна, 61002)

E-mail: andrii.kondratiev@kname.edu.ua

EVALUATION OF FIRE RESISTANCE OF FIRE PROTECTED STEEL STRUCTURES

Purpose. Evaluation of fire resistance of fire-resistant steel structures using the developed calculation and experimental method.

Methods. Finite difference method, landfill fire test method, mathematical and computer modeling of non-stationary heat exchange processes, determination of thermophysical characteristics of fire-retardant coatings based on solving direct and inverse thermal conductivity problems.

Results. Geometric, physical, computer models have been developed, with the help of which the fire resistance of fire-resistant steel structures has been evaluated by the calculation-experimental method. The adequacy of the developed method for assessing the fire resistance of fire-resistant steel structures in assessing the fire resistance of fire-resistant I-beam steel column has been checked. The analysis of tests on fire resistance of fire-resistant steel columns exposed to fire at the standard temperature of the fire without the load applied to them has been carried out. A computer model of the "steel column - reactive flame retardant coating" system has been built for numerical simulation of non-stationary heating of such a system. The fire resistance of fire-resistant steel columns of I-beam section without load applied to them has been evaluated using the calculation-experimental method. Verification of results of experimental research with results of numerical modeling has been carried out.

Scientific novelty. The convergence of the results of experimental data on the duration of fire exposure at the standard temperature of the fire to reach the critical temperature of steel with the results of numerical simulations has been determined. Based on the comparison of the experimental results and numerical modeling, 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 a standard fire temperature has been confirmed. The efficiency of the proposed calculation and experimental method for assessing the fire resistance of fire-resistant steel structures has been confirmed.

Practical significance. It consists in the implementation of the results on objects of different purposes in assessing the fire resistance of fire-resistant steel structures by evaluating the effectiveness of fire-retardant coatings of steel building structures.

Keywords: fire resistance, fire resistance assessment method, fire protection, fire protection ability, fire protective coatings, steel structures.

Andrii Kovalov – PhD, Senior Research, Doctoral studies, National University of Civil Defence of Ukraine, (Chernyshevska str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023).

E-mail: kovalev27051980@gmail.com

Yurii Otrosh – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Fire prevention in settlements, National University of Civil Defence of Ukraine, (Chernyshevska str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023).

E-mail: otrosh@nuczu.edu.ua

Vitalii Tomenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Cherkasy Institute of Fire Safety of National University of Civil Defence of Ukraine, (Onoprienka str., 8, Cherkasy, Ukraine, 18034).

E-mail: firech1996@gmail.com

Andrii Kondratiev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Kharkiv National University of Municipal Economy named after O.M. Beketova, (Marshal Bazhanov str., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002).

E-mail: andrii.kondratiev@kname.edu.ua