



A. I. Kovalov¹, Yu. A. Otrosh¹, R. R. Purdenko¹, V. I. Tomenko²

¹Національний університет цивільного захисту України,

²Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6525-7558> – А. І. Ковальов

<https://orcid.org/0000-0003-0698-2888> – Ю. А. Отрош

<https://orcid.org/0000-0001-6467-4133> – Р. Р. Пурденко

<https://orcid.org/0000-0001-7139-9141> – В. І. Томенко



kovalev27051980@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАХИЩЕНИХ РЕАКТИВНОЮ ВОГНЕЗАХИСНОЮ РЕЧОВИНОЮ СТАЛЕВИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Проблема. У світі щорічно виникає близько 8 мільйонів пожеж, на яких гине приблизно 90 тис. людей. Близько 51 % всіх пожеж виникають в будівлях і спорудах та на транспорті, і при цьому на таких пожежах 90–95 % від жертв на пожежах. Масштабні трагедії, пов'язані з пожежами, забирають і зараз тисячі життів, а також призводять до мільйонних збитків. Наведені чинники створюють потребу в захисті людини від впливу окреслених загроз. Умовою зниження незворотних наслідків пожеж на об'єктах різного призначення є забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій шляхом збереження несучої здатності будівельних конструкцій, в тому числі і сталевих. Одним із пріоритетних напрямків забезпечення вогнестійкості будівель та споруд є використання вогнезахисних будівельних конструкцій.

Мета. Розробка кінцево-елементної моделі для дослідження вогнестійкості вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій за допомогою сучасних програмних комплексів (на прикладі ЛІРА-САПР (Україна)).

Методи. Методи експериментального дослідження поведінки зразків при нагріванні, регламентованих вимогами державних стандартів України. Для моделювання теплообміну в елементах вогнезахисних сталевих конструкцій при пожежі, а також при дослідженні процесів тепломасообміну у печі при випробуваннях на вогнестійкість використовувалися числові методи кінцевих елементів, кінцевих різниць, комп'ютерне моделювання процесів нестационарного теплообміну.

Результати. У статті досліджено вогнестійкість вогнезахисних сталевих колон за допомогою моделювання теплового стану колони. Розроблена кінцево-елементна модель дає змогу з достатньою для інженерних розрахунків точністю моделювати теплові процеси в системі «вогнезахисна колона – вогнезахисне покриття». При цьому можливо враховувати теплофізичні характеристики матеріалу колони та вогнезахисних покриттів.

Висновки. Розроблено кінцево-елементну модель вогнезахисної сталеві колони двотаврового перерізу в програмному комплексі ЛІРА-САПР, за допомогою якої проведено теплотехнічний розрахунок колони. В результаті встановлено задовільну збіжність результатів розрахункового та експериментального дослідження вогнестійкості (похибка не більше 20%). Переверіено працездатність розробленої кінцево-елементної моделі вогнезахисної сталеві колони.

Ключові слова: вогнестійкість, вогнезахисні покриття, чисельне моделювання, сталеві конструкції, оцінювання вогнестійкості, вогнезахист, ЛІРА-САПР.

A.I. Kovalov¹, Yu.A. Otrosh¹, R.R. Purdenko¹, V.I. Tomenko²,

¹National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

²Cherkassy institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

RESEARCH OF FIRE RESISTANCE OF FIREPROOF STEEL BUILDING STRUCTURES

Introduction. About 8 million fires occur in the world every year, in which approximately 90,000 people die. About 51% of all fires occur in buildings and structures and on transport, and at the same time, the majority (90-95%) of fire victims die in such fires. Large-scale tragedies related to fires are still taking thousands of lives and causing millions of dollars in damages. The above factors create a need for human protection against the effects of the outlined threats.

A condition for reducing the irreversible consequences of fires at objects of various purposes is to ensure the fire resistance of building structures by preserving the load-bearing capacity of building structures, including steel ones. One of the priority directions for ensuring fire resistance of buildings and structures is the use of fire-resistant building structures.

Purpose. Development of a finite-element model for the study of fire resistance of fire-resistant steel building structures using modern software complexes (on the example of LIRA-SAPR (Ukraine)).

Methods. Methods of experimental research of the behaviour of samples during heating, regulated by the requirements of state standards of Ukraine. Numerical methods of finite elements, finite differences, and computer modelling of non-stationary heat exchange processes were used to simulate heat transfer in elements of fire-resistant steel structures during a fire, as well as in the study of heat and mass transfer processes in the furnace during fire resistance tests.

Results. The article examines the fire resistance of fire-resistant steel columns using modelling the thermal state of the column. The developed finite-element model allows the simulation of thermal processes in the "fire-resistant column - fire-resistant coating" system with sufficient accuracy for engineering calculations. At the same time, it is possible to take into account the thermophysical characteristics of the column material and fire-resistant coatings.

Conclusions. A finite-element model of a fire-resistant steel column of I-beam cross-section was developed in the LIRA-CAD software complex, with the help of which thermal engineering calculation of the column was carried out. As a result, a satisfactory convergence of the results of the calculation and experimental study of fire resistance was established (error of no more than 20%). The performance of the developed finite-element model of a fire-resistant steel column was checked.

Keywords: fire resistance, fire protection coatings, numerical modelling, steel structures, fire resistance assessment, fire protection, LIRA- SAPR.

Постановка проблеми. У світі щорічно виникає близько 8 мільйонів пожеж, на яких гине приблизно 90 тис. людей. Близько 51 % всіх пожеж виникають в будівлях і спорудах та на транспорті, і при цьому на таких пожежах гине 90–95 % від жертв на пожежах. Винятком є Барбадос, Польща і Португалія, де пожежі в будівлях і на транспорті становлять менше 22 % від загальної кількості, а також Литва і Естонія – менше 30 %. Проте в Україні та Сінгапурі пожежі в будівлях і на транспорті становлять не менше 75 % від загальної кількості [1]. Кількість пожеж в Україні, що сталися у будівлях та спорудах упродовж 2007–2020 років, в середньому, становить 52,7 % від загальної чисельності, а кількість загиблих на них – 95,5 %. Не дивлячись на технічний прогрес у будівництві та техніці ліквідації пожеж, і в наші дні пожежі не стали менш небезпечними. Масштабні трагедії, пов'язані з пожежами, забирають і зараз тисячі життів та призводять до мільйонних збитків. Наведені чинники створюють потребу в захисті людини від впливу окреслених загроз. Умовою зниження незворотних наслідків пожеж на об'єктах різного призначення є забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій в тому числі і сталевих, шляхом збереження їх несучої здатності. Одним із пріоритетних напрямків забезпечення вогнестійкості будівель та споруд є використання вогнезахисних будівельних конструкцій.

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

Створення основ ефективного оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій з науково обґрунтованими

параметрами їх вогнезахисних покриттів є актуальною проблемою, розв'язання якої дасть змогу підвищити точність розрахунку нестационарного прогріву вогнезахисних сталевих конструкцій з достатньою для інженерних розрахунків точністю як з використанням даних експериментальних досліджень, так і за результатами чисельного моделювання в сучасних програмних комплексах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вимоги до стійкості будівель та споруд забезпечуються комплексом заходів, що передбачаються як технологією виробництва, так і застосуванням будівельних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів, які представлені широким спектром. Аналіз характеристик та параметрів покриттів потребує детального вивчення та є актуальною проблемою, розв'язання якої призведе до підвищення рівня забезпечення вогнестійкості будівель та споруд при високотемпературному впливі. В роботі [2] досліджено ефективність та вплив різних реактивних вогнезахисних покриттів на експлуатаційні властивості сталі у разі пожежі. Однак, не зважаючи на оригінальність отриманих результатів, вогневі випробування проводилися на зразках зменшених розмірів. Це незавжди дозволяє з достатньою точністю оцінювати вогнестійкість вогнезахисних сталевих конструкцій, а саме колон. В роботі більше уваги приділено вивченню властивостей досліджуваних реактивних вогнезахисних покриттів, а не дослідженню вогнестійкості вогнезахисних сталевих колон. Авторами [3] запропоновано використовувати програмне забезпечення SAFIR, за допомогою якого розроблено кінцево-елементну модель для чисельного моделювання поведінки будівельних конструкцій при дії

вогнища пожежі. Однак незважаючи на практичну значимість таких результатів слід зазначити, що поза увагою дослідників залишилися питання моделювання теплового стану вогнезахисних сталевих конструкцій. Очевидно це пов'язано з труднощами побудови вогнезахисної конструкції у вказаному програмному комплексі і правильному і точному задаванні параметрів вогнезахисних покриттів. Автори [4] пропонують використовувати при стаціонарному і нестаціонарному прогріві вогнезахисних сталевих конструкцій під час пожежі постійне значення коефіцієнта теплопровідності реактивного вогнезахисного покриття. Таке припущення дозволяє оцінювати вогнестійкість вогнезахисних сталевих конструкцій, проте це впливає на точність розрахунків. Це накладає певні обмеження на оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій за допомогою розроблених моделей, тому що, як відомо, найбільша точність розрахунків спостерігається при задаванні теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів, які залежать від температури. В [5] досліджено поведінку сталевих порожнистих колон при підвищених температурах. Розроблені кінцево-елементні моделі для чисельного моделювання поведінки сталевих колон за підвищених температур. Проте не визначено, як ці моделі можна застосовувати для вогнезахисних сталевих конструкцій. З практичної точки зору це може викликати труднощі, що пов'язані з врахуванням теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів для підвищення меж вогнестійкості сталевих конструкцій. У [6] наведено результати експериментальних досліджень вогнезахисних сталевих пластин різних розмірів при стандартному температурному режимі або режимі пожежі, яка повільно розвивається. Проте, результати, отримані на зразках зменшених розмірів, не дозволяють оцінювати вогнестійкість вогнезахисних сталевих конструкцій. Це накладає деякі обмеження на застосування цих результатів, і як наслідок, дає великі похибки при дослідженні вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій при інших довільних температурних режимах пожежі. В [7] наведені результати експериментального дослідження вогнезахисної здатності реактивних вогнезахисних покриттів для захисту несучих сталевих конструкцій. Експерименти проводяться на сталевих пластинах при різних температурних режимах пожежі. Проте поза увагою дослідників залишилися питання дослідження вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій за допомогою чисельного моделювання в сучасних

програмних комплексах. Це накладає певні обмеження на аналіз вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій. Спроби зняти вказані обмеження наводяться в [8], де проведено чисельне моделювання поведінки сталевих конструкцій під впливом вогнища пожежі. Проте, незважаючи на переваги такого підходу, відкритим залишається питання дослідження вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. У [9] були досліджені реактивні вогнезахисні покриття та вивчені їх експлуатаційні характеристики з використанням чотирьох різних режимів пожежі (стандартний, вуглеводневої пожежі і дві самостійно розроблені криві зі зниженою температурою). Проте, не в повній мірі були досліджені питання щодо розрахункового визначення вогнестійкості сталевих конструкцій з вогнезахистом. В [10] досліджено температурне поле по товщині металевої конструкції в залежності від величини теплового потоку, товщини конструкції та вогнезахисного покриття та їх теплофізичних характеристик за допомогою розробленої математичної моделі. Отримано аналітичні залежності нестаціонарного температурного прогріву в товщі плоских конструкцій з урахуванням теплофізичних характеристик матеріалу конструкцій. Однак незважаючи на практичну значимість таких результатів слід зазначити, що поза увагою авторів залишилися питання моделювання теплового стану вогнезахисних сталевих конструкцій за допомогою сучасних програмних комплексів, що значно полегшує процедуру оцінювання вогнестійкості конструкцій.

Систематизація проведених досліджень дає змогу констатувати тенденцію поширення підходів до оцінювання меж вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій за допомогою розрахунково-експериментального методу. Такий метод дає змогу враховувати значення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів та процеси теплообміну у конструкції в умовах впливу довільних температурних режимів пожежі. Застосування методу доцільне під час визначення меж вогнестійкості вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій та вогнезахисної здатності покриттів для таких конструкцій.

Метою статті є розробка кінцево-елементної моделі для дослідження вогнестійкості вогнезахисних сталевих будівельних конструкцій за допомогою сучасних програмних комплексів (на прикладі ЛПА-САПР (Україна)). Це дає можливість оцінювати вогнестійкість вогнезахисних сталевих конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення такі завдання:

- побудувати кінцево-елементну модель вогнезахисної сталеві колони;
- провести моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної сталеві колони;
- перевірити працездатність розробленої кінцево-елементної моделі вогнезахисної сталеві колони.

Виклад основного матеріалу.

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

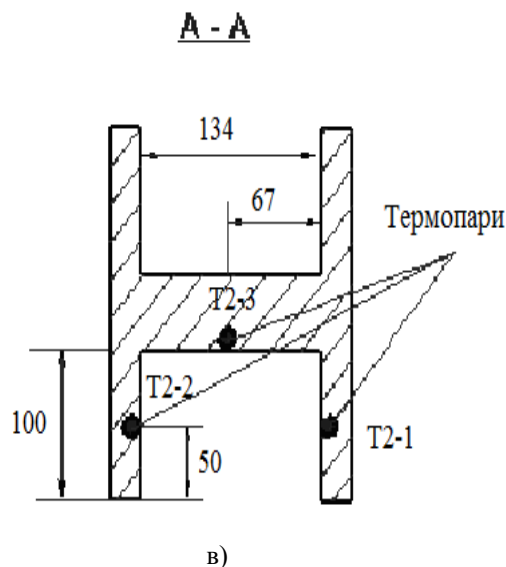
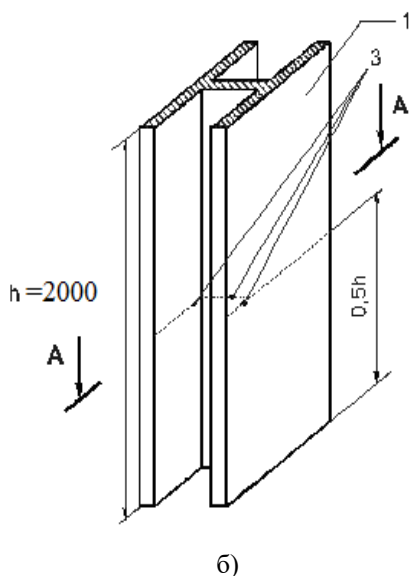
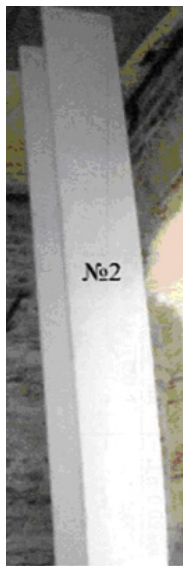


Рисунок 1 – Загальний вигляд вогнезахисної колони (а) та схема розташування термометрів на колоні (б, в), які випробовуються без навантаження

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

Температурний режим в печі був відтворений згідно із стандартним температурним режимом пожежі (рис. 2)

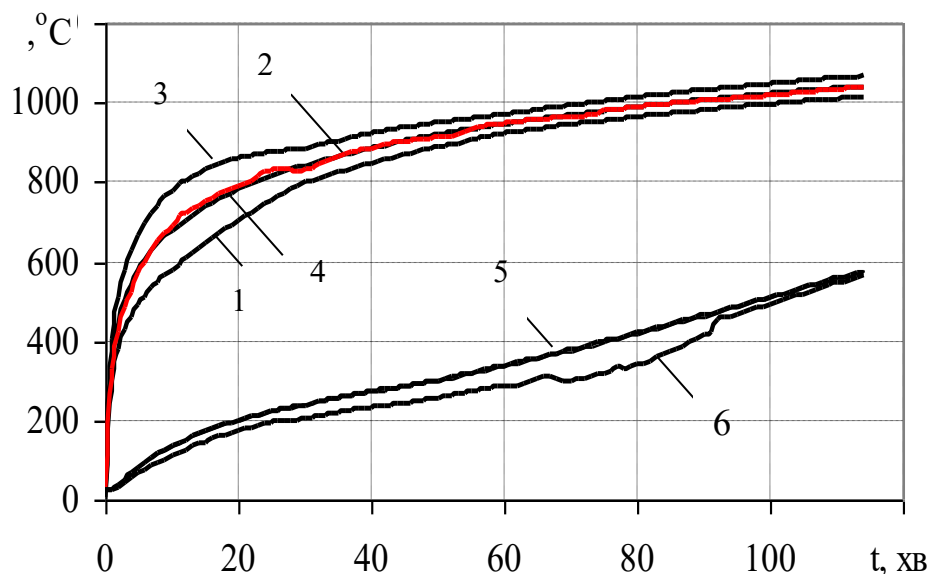


Рисунок 2 – Залежність температури в печі (криві 1–4) та середніх температур зразків вогнезахисних сталевих колон від тривалості вогневого впливу: 5 – зразок колони № 2; 6 – зразок колони № 1

Обігрів відбувався з чотирьох сторін колони.

Приведені на рис. 2 (криві 5, 6) температурні залежності середніх температур зразків вогнезахисних сталевих колон від тривалості вогневого впливу порівнювались з результатами комп'ютерного моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної сталеві колони, виконані за допомогою програмного забезпечення ЛІРА-САПР. Для порівняння результатів моделювання з експериментальним визначенням температур вогнезахисної сталеві колони у визначених місцях (рис. 1 б, в) в умовах

вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі брали значення температури зразка колони № 2 (рис. 2, крива 5), яка найбільше прогрілася в результаті випробування (консервативний підхід).

Було побудовано кінцево-елементну модель вогнезахисної сталеві колони, призначено типи жорсткості, вибрано крок розбивки колони на елементи (рис. 3). Модель складається з 42907 елементів. Крок розбиття по перерізу становить $h=0,01$ м, часовий крок $\Delta t=60$ с.

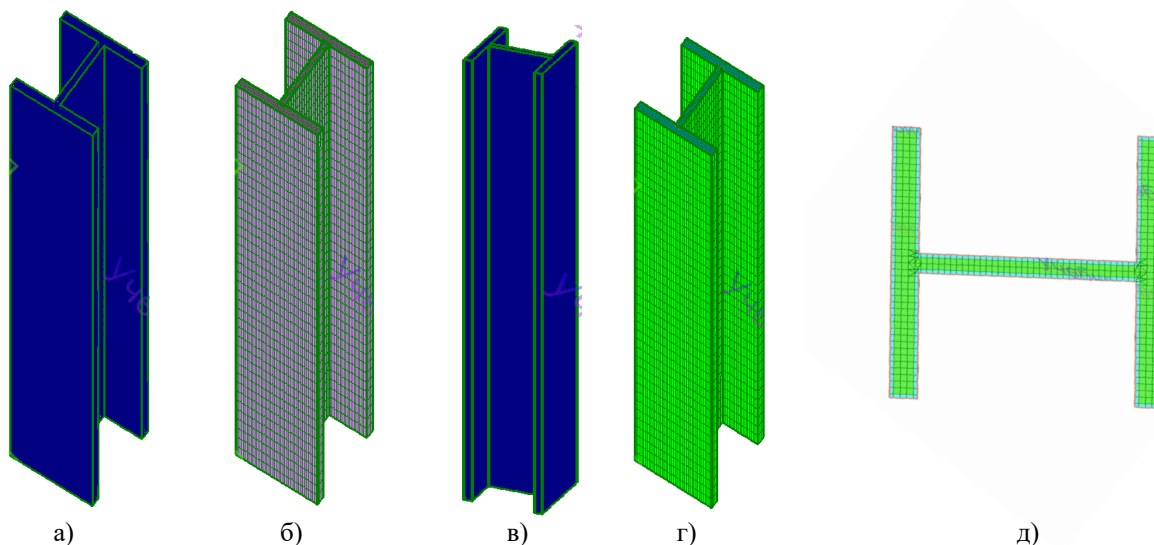


Рисунок 3 – Модель вогнезахисної сталеві колони в 3D (а-г) і 1D (д) постановках

Алгоритм розрахунку полягав у визначенні температури у кожному вузлі перерізу розробленої розрахункової моделі. Координатна сітка накладалася так, щоб її вузли розташовувалися не

тільки в товщині перерізу, але і по його периметру. Для цього задавали теплофізичні характеристики сталі, зображені на рис. 4.

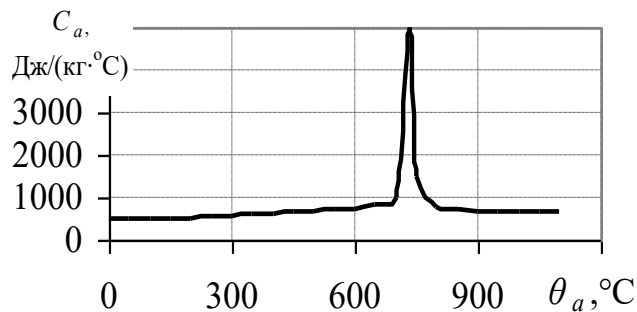
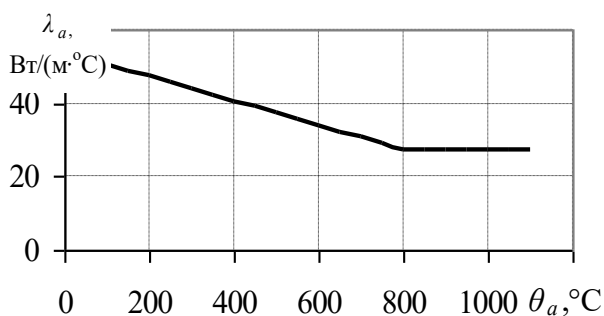


Рисунок 4 – Коефіцієнт теплопровідності (а) та питома теплоємність (б) сталі

Теплофізичні характеристики досліджуваного реактивного вогнезахисного покриття для їх використання в розрахунках нестационарного прогріву вогнезахисної сталеві колони були визначені в попередніх

роботах [10–11]: коефіцієнт теплопровідності (рис. 5) і постійне значення питомої об'ємної теплоємності $1 \cdot 10^5$ Дж/м³·°С.

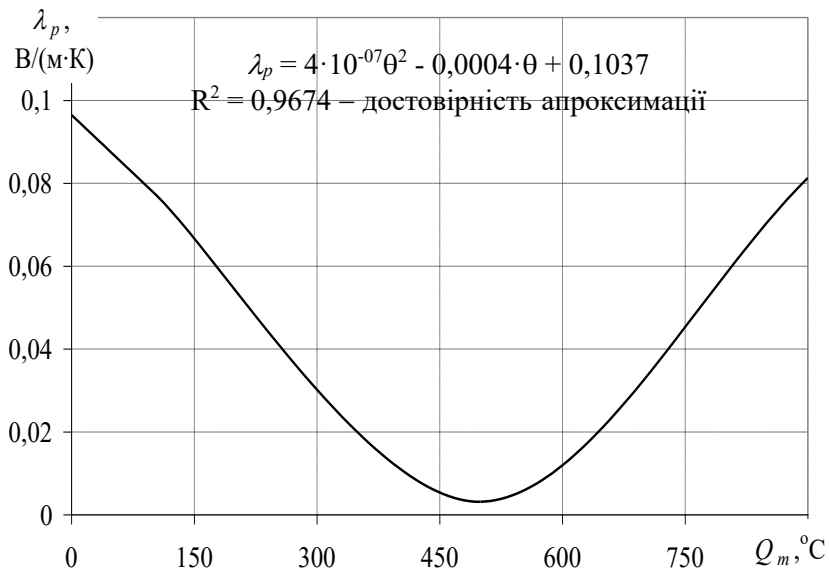


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта теплопровідності досліджуваного реактивного покриття від температури, знайдена розв’язанням обернених задач теплопровідності

Як видно із рис. 5, в діапазоні температур від 0 °С до 500 °С значення коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття на порядок падає, порівняно з початковим значенням, і проходить через мінімальне екстремальне значення 0,003 Вт/м·°С (за температури 500 °С), що пояснюється спученням вогнезахисного покриття в заданому температурному діапазоні, а далі лінійно зростає до початкового значення, що пояснюється вигоранням шару покриття під дією температури та збільшенням радіаційної складової.

Закономірність поведінки коефіцієнта теплопровідності реактивного вогнезахисного покриття від температури описується лінійною поліноміальною залежністю типу:

$\lambda_p = 4 \cdot 10^{-07} \cdot \theta^2 - 0,0004 \cdot \theta + 0,1037$ з достовірністю апроксимації 0,9674 (рис. 5).

Геометричні розміри вогнезахисної колони для моделювання її теплового стану зображено на рис. 6.

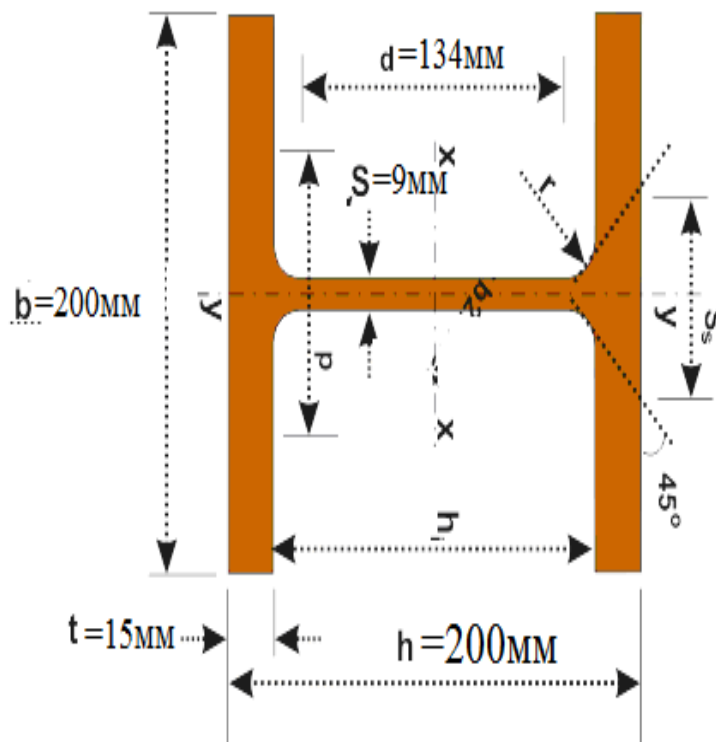


Рисунок 6 – Геометричні розміри сталевій колони для моделювання

В результаті чисельного моделювання були отримані розподіли температур у вогнезахищеній сталевій колоні протягом

випробування в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі (рис. 7).

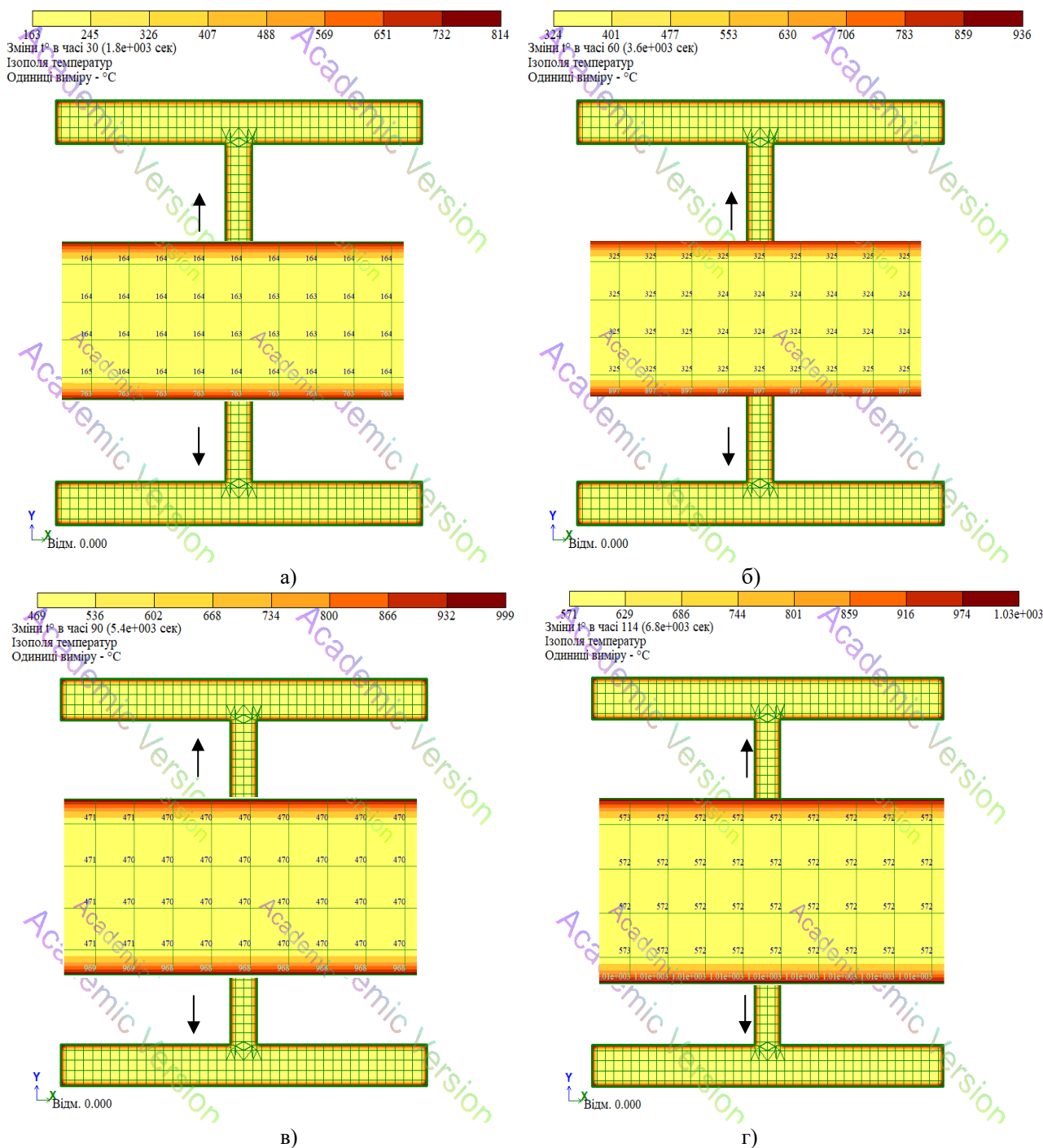


Рисунок 7 – Розподіл температур в вогнезахищеній сталевій колоні на 30 (а), 60 (б), 90 (в) та 114 (г) хвилині випробування

Розрахунки проводилися на ліцензованому програмному забезпеченні в програмному комплексі ЛПА-САПР (ліцензія № 1/8583 від 16.02.2022).

Розроблена модель в програмному комплексі ЛПА-САПР враховує радіаційно конвективний теплообмін у газомусередовищі від джерела теплового впливу до поверхні вогнезахищеної сталевій колоні та теплообмін теплопровідністю у

вогнезахищеній колоні. Інші параметри для моделювання теплового стану вогнезахищеної сталевій колоні задавалися згідно з [12]. В результаті чисельного моделювання розв'язанням прямих задач теплопровідності були отримані розрахункові значення прогріву вогнезахищеної сталевій колоні, які зображено на рис. 8.

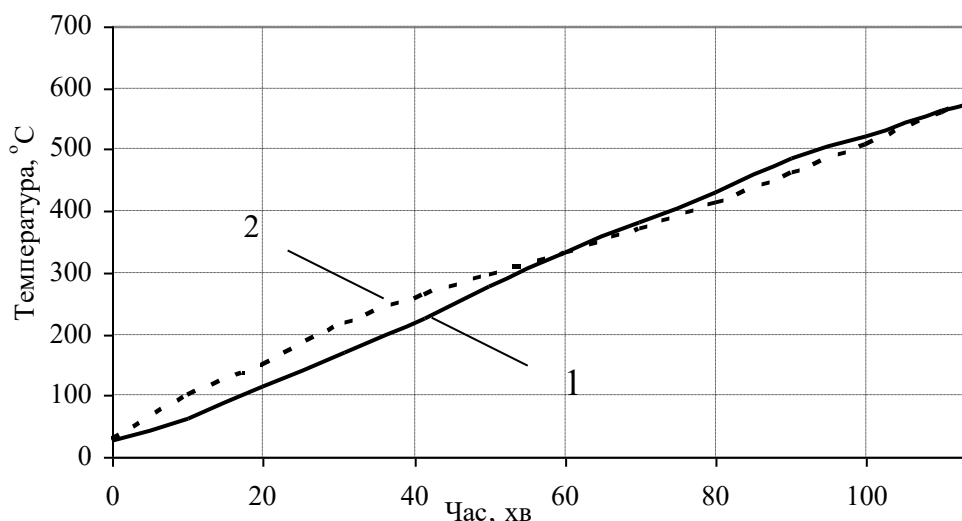


Рисунок 8 – Залежність температури на полках вогнезахищеної сталевій колони від часу вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі: 1 – експериментальна крива; 2 – розрахункова крива

Виходячи з результатів, зображених на рис. 8, можна констатувати правильність побудови моделі в програмному середовищі ЛПА-САПР, правильність задавання параметрів, початкових та граничних умов. Для доведення цього твердження достатньо дослідити характер кривих зміни температури на полках вогнезахищеної сталевій колони від часу вогневого впливу (рис. 8). Це не розходиться з експериментальними даними (рис. 8, крива 1), оскільки розрахункова крива (рис. 8, крива 2) зміни температури від часу вогневого впливу на полках вогнезахищеної сталевій колони добре корелює з експериментальною. Це, в свою чергу, говорить про задовільну адекватність розробленої кінцево-елементної моделі для теплотехнічного розрахунку теплового стану вогнезахищеної сталевій колони [13].

Висновки

1. Розроблено кінцево-елементну модель вогнезахищеної реактивним вогнезахисним покриттям сталевій колони двотаврового перерізу в програмному комплексі ЛПА-САПР, яка дає змогу досліджувати вогнестійкість залізобетонних конструкцій шляхом моделювання нестационарного прогріву вогнезахищеної конструкції, враховуючи теплофізичні та механічні властивості матеріалів.

2. За допомогою розробленої моделі проведено моделювання нестационарного прогріву вогнезахищеної сталевій колони, суть якого полягала у розв'язанні задачі нестационарної теплопровідності. Розрахунок зводився до визначення температури сталевій конструкції у будь-якій точці поперечного перерізу в заданий час. В результаті встановлено, що розрахункові значення температур задовільно корелюють з експериментальними даними.

3. Проведено перевірку працездатності розробленої кінцево-елементної моделі вогнезахищеної сталевій колони. В результаті встановлено задовільну збіжність експериментальних та розрахункових температур (з точністю до 20 %). При цьому найбільше відхилення температури від експериментальних значень спостерігалось на 30 хвилині розрахунку і становило 40 °С, що відповідає похибці не більше 20 %. Це вказує на правильність задавання початкових та граничних умов, побудови комп'ютерної моделі теплових процесів в системі «вогнезахищена сталеві колонна – вогнезахисне покриття». Доведено адекватність моделі реальним процесам, що відбуваються при нагріванні вогнезахищених сталевих конструкцій без прикладення навантаження в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму пожежі.

Список літератури:

- Brushlinsky, N. N., Sokolov, S. V., Wagner, P. & Messerschmidt, B. (2022). World fire statistics. Center of fire statistics.– 2022. – Report, 27. (2022). https://www.ctif.org/sites/default/files/2022-08/CTIF_Report27_ESG_0.pdf.
- Yew, M. C., & Ramli Sulong, N. H. (2012). Fire-resistive performance of intumescent flame-retardant coatings for steel. *Materials and Design*, 34, 719–724. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.032>.
- Franssen, J. M., & Gernay, T. (2017). Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering*, 8(3), 300–323. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>.
- 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>.

5. Yan, X., & Gernay, T. (2022). Local buckling of cold-formed high-strength steel hollow section columns at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107403>.

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. Lucherini, A., & Maluk, C. (2019). Assessing the onset of swelling for thin intumescent coatings under a range of heating conditions. *Fire Safety Journal*, 106, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.014>.

8. Both, I., Wald, F., & Zaharia, R. (2016). Benchmark for numerical analysis of steel and composite floors exposed to fire using a general purpose FEM code. *Journal of Applied Engineering Science*, 14(2), 275–284. <https://doi.org/10.5937/jaes14-8664>.

9. 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. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102951>.

10. Semerak M., Subota, A., Novak, V., & Baytala, V. (2012). Математичне моделювання вогнестійкості несучих металевих конструкцій машинних залів електростанцій. Пожежна безпека, 21, 7-12. Retrieved journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/610.

11. 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.

12. 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.

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

14. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures: monograph / V. Sadkovyi, E. Rybka, Yu. Otrosh and others. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 2021, 180 p.

References:

1. Brushlinsky, N. N., Sokolov, S. V., Wagner, P. & Messerschmidt, B. (2022). World fire statistics. Center

of fire statistics.– 2022. – Report, 27. (2022). https://www.ctif.org/sites/default/files/2022-08/CTIF_Report27_ESG_0.pdf.

2. Yew, M. C., & Ramli Sulong, N. H. (2012). Fire-resistive performance of intumescent flame-retardant coatings for steel. *Materials and Design*, 34, 719–724. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.032>.

3. Franssen, J. M., & Gernay, T. (2017). Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering*, 8(3), 300–323. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>.

4. 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>.

5. Yan, X., & Gernay, T. (2022). Local buckling of cold-formed high-strength steel hollow section columns at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107403>.

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. Lucherini, A., & Maluk, C. (2019). Assessing the onset of swelling for thin intumescent coatings under a range of heating conditions. *Fire Safety Journal*, 106, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.014>.

8. Both, I., Wald, F., & Zaharia, R. (2016). Benchmark for numerical analysis of steel and composite floors exposed to fire using a general purpose FEM code. *Journal of Applied Engineering Science*, 14(2), 275–284. <https://doi.org/10.5937/jaes14-8664>.

9. 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. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102951>.

10. Semerak M., Subota, A., Novak, V., & Baytala, V. (2012). Математичне моделювання вогнестійкості несучих металевих конструкцій машинних залів електростанцій. Пожежна безпека, 21, 7-12. Retrieved <http://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/610>.

11. 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.

12. Kovalov, A., Slovinskyi, V., Udianskyi, M., Ponomarenko, I., Anszczak, M. Research offireproof capability of coating for metal constructions using calculation-experimental method. In Materials Science Forum. 2020. Vol. 1006 MSF. P. 3–10.

13. EN1993-1-2:2005.Eurocode 3,Design of steel structures, Part 1.2, general rules – Structural fire design.

14. Fire resistance of reinforced concrete and steel structures: monograph / V. Sadkovyi, E. Rybka, Yu. Otrosh and others. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 2021, 180 p.

© А. І. Ковальов, Ю. А. Отрош,
Р. Р. Пурденко, В. І. Томенко, 2022.
Науково-методична стаття.
Надійшла до редакції 30.09.2022.
Прийнято до публікації 12.12.2022.