

УДК 614.841.45

## ВПЛИВ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОГНЕЗАХИСНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ТЕПЛОВИЙ СТАН СТАЛЕВИХ КОЛОН ЗА СТАНДАРТНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1.88-110>

Новак С. В<sup>1\*</sup>, ORCID iD 0000-0001-7087-318X

Дріжд В. Л.<sup>2</sup>, ORCID iD 0000-0003-2507-7007

Добростан О. В<sup>1</sup>, ORCID iD 0000-0001-8908-0729

Новак М. С. ORCID iD 0000-0002-5888-5812

\*E-mail: novak.s.fire@gmail.com

<sup>1</sup>Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

<sup>2</sup>Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л. М.Литвиненка, Україна

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 24.05.2022

Пройшла рецензування: 02.06.2022

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогнезахисний матеріал;  
коефіцієнт теплопровідності;  
критична температура сталі;  
необхідна мінімальна товщина;  
сталева колона; стандартний температурний режим;  
теплофізичні властивості

### АНОТАЦІЯ

Зважаючи на необхідність оптимізації параметрів систем вогнезахисту будівельних конструкцій для подальшого удосконалення і розвитку технології таких систем, актуальним є дослідження, спрямоване на визначення впливу теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, на тепловий стан сталевих колон в умовах стандартного температурного режиму. За мету ставилось з'ясування залежностей між необхідною мінімальною товщиною систем вогнезахисту, теплофізичними властивостями вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, критичною температурою сталі, коефіцієнтом поперечного перерізу і проміжком часу збереженості вогнестійкості сталевих колон. Для досягнення цього було вирішено завдання з визначення даних щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів для досліджуваних систем вогнезахисту, узагальнення отриманих розрахункових даних і виявлення залежності цієї товщини від теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів та інших параметрів систем вогнезахисту. Встановлено, що значення цієї товщини як для систем із вогнезахисним екраном, так і без нього, суттєво залежить від коефіцієнта теплопровідності застосованих вогнезахисних матеріалів  $\lambda_p$ , коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V_s$ , критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  і проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr}$ . З підвищенням  $\lambda_p$ ,  $A_m/V_s$ ,  $t_{fr}$  і зменшенням  $\theta_{cr}$  товщина  $d_{p,min}$  збільшується. Показано, що у разі застосування для сталевих колон систем вогнезахисту з вогнезахисним екраном закономірним є зменшення товщини вогнезахисту  $d_{p,min}$  порівняно із системами без екрана. Абсолютна різниця  $\Delta_{d,AB}$  і відносна різниця  $\delta_{d,AB}$  між значенням товщини покриття, отриманим для системи без вогнезахисного екрана, і значенням товщини покриття, отриманим для системи з вогнезахисним екраном без вогнезахисного покриття на його поверхні, змінюються в діапазонах від 0,06 мм до 15,5 мм і від 0,35 % до 51,6 % відповідно. Для систем вогнезахисту з екраном і вогнезахисним покриттям на його поверхні та/або на поверхні колони величина необхідної мінімальної товщини вогнезахисту є найбільш зменшеною порівняно із системами без екрана для малих значень коефіцієнта поперечного перерізу  $(A_m/V)_{min}$  і проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr,min}$ . Визначено дані щодо різниці між значеннями необхідної мінімальної товщини вогнезахисту, отриманими для систем із вогнезахисним покриттям на зовнішній поверхні екрана і без нього.

**Постановка проблеми.** Відповідно до EN 13501-2:2016 [1] для колон характеристичним критерієм є несуча здатність, встановлено такі класи за вогнестійкістю: R 15, R 20, R 30, R 45, R 60, R 90, R 120, R 180, R 240 та R 360. Згідно з положеннями Будівельного Єврокоду № 3 [2] вогнестійкість сталевих колон за температурним критерієм вважають забезпеченою у разі виконання такої умови:

$$\theta_a \leq \theta_{a,cr}, \quad (1)$$

де  $\theta_a$  – фактична температура сталеві колони (далі – сталі), °C;

$\theta_{a,cr}$  – критична температура сталеві колони, °C.

Критичною температурою сталеві колони (далі – сталі) є температура, за якої очікується руйнування цієї колони за рівномірного розподілу температури для заданого рівня навантаження.

Умову (1) має бути виконано для проміжку часу (у хвиликах) вогневого впливу за стандартного температурного режиму, який відповідає проміжку часу класифікації колони за вогнестійкістю, наведеному після літери R у зазначенні класу вогнестійкості.

На об'єктах будівництва широко використовують сталеві колони двотаврового поперечного перерізу (I або H) з короткими або довгими полицями, а також пустотілі колони круглого або прямокутного поперечного перерізу [3–4].

Незахищені сталеві колони зазвичай зберігають вогнестійкість протягом проміжку часу вогневого впливу за стандартного температурного режиму, який складає не більше ніж 10 хв. Для підвищення цього проміжку часу застосовують різні засоби вогнезахисту. До них належать пасивні і реактивні системи вогнезахисту, профільовані й коробчасті системи вогнезахисту, вертикальні вогнезахисні екрани, комбіновані системи вогнезахисту [3–7]. Тепловий стан сталевих колон, оснащених вогнезахистом (далі – захищених сталевих колон), значною мірою залежить від параметрів системи

вогнезахисту, яку для них застосовують, зокрема від теплофізичних властивостей і товщини вогнезахисного покриття або облицювання [8]. Через брак даних щодо впливу теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на цей тепловий стан не можна проводити оптимізацію параметрів систем вогнезахисту сталевих колон, наприклад за масо-габаритним критерієм (мінімізація маси та/або товщини системи вогнезахисту). З огляду на необхідність такої оптимізації для подальшого удосконалення і розвитку технології вогнезахисту сталевих колон актуальним слід вважати дослідження, спрямоване на визначення впливу теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, на тепловий стан сталевих колон в умовах стандартного температурного режиму.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Незахищені сталеві конструкції, такі як колони і балки, через велику теплопровідність сталі, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму швидко (протягом декількох хвилин) прогриваються до критичної температури, яка зазвичай знаходиться в діапазоні від 350 °C до 700 °C [2–4]. Для сталевих конструкцій, оснащених вогнезахистом, інтенсивність нагрівання менша, а проміжок часу настання критичної температури більший, ніж у незахищених сталевих конструкцій.

Типове підвищення температури сталевих конструкцій, оснащених реактивним вогнезахисним покриттям, що спучується, характеризується трьома стадіями [9]. Приклад теплового стану таких двох сталевих конструкцій з однаковою товщиною вогнезахисного покриття, яка складає 0,8 мм, і різним коефіцієнтом поперечного перерізу в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму наведено на рис. 1 [6]. На першій стадії, на якій температура сталі нижча за 200 °C, швидкість зростання температури цих сталевих конструкцій висока. Це пов'язано

з тим, що теплофізичні і хімічні властивості реактивного вогнезахисного матеріалу на цій стадії не зазнають істотних змін. Завдяки цьому і порівняно високим значенням коефіцієнта теплопровідності та густини реактивного вогнезахисного матеріалу, а також наявності тонкого шару вогнезахисного покриття на цій стадії має місце значне підвищення температури сталі. На другій стадії, на якій температура сталі має значення від 200 °С до 350 °С, покриття зазнає повного спучування з утворенням товстого шару з низькою густиною і звугленим вогнезахисним шаром, що має низьку теплопровідність. Швидкість зростання температури сталі на цій стадії зменшується порівняно з першою. На третій стадії, на якій температура сталі більша за 350 °С, теплопровідність покриття збільшується завдяки його високій температурі, втраті маси і зменшенню товщини. Швидкість

зростання температури сталі на цій стадії помітно підвищується порівняно з другою стадією.

Значення коефіцієнта теплопровідності реактивних вогнезахисних матеріалів, що спучуються, суттєво залежить від температури і початкової товщини вогнезахисного покриття, а також коефіцієнта поперечного перерізу сталевих конструкцій та змінюється в широкому діапазоні: від 0,002 Вт/(м·°С) до 0,15 Вт/(м·°С) [8; 10–13]. Що ж до інших теплофізичних властивостей цих матеріалів, таких як питома теплоємність і густина, то їхня залежність від зазначених параметрів є менш значною, ніж для коефіцієнта теплопровідності [8], і зазвичай під час розрахунків теплового стану захищених сталевих конструкцій їхні значення приймають сталими [2–3].

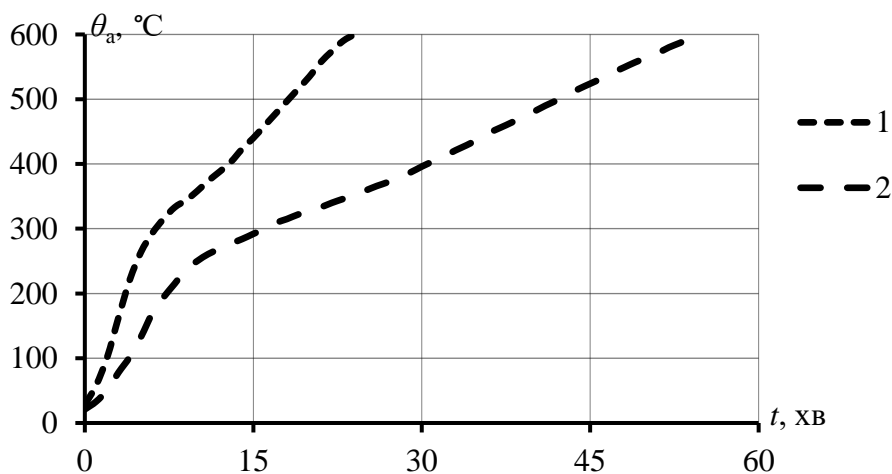


Рисунок 1 – Залежність температури сталі від тривалості вогневого впливу за стандартного температурного режиму для сталевих конструкцій з реактивним вогнезахисним матеріалом, що спучується, і різним коефіцієнтом поперечного перерізу: 1 –  $A_m/V = 200 \text{ м}^{-1}$ , 2 –  $A_m/V = 100 \text{ м}^{-1}$  [6]

Джерело: розроблено авторами

Порівняно з реактивними вогнезахисними покриттями, що спучуються, пасивні вогнезахисні матеріали (через те, що в них під час вогневого впливу не відбувається перебіг хімічних реакцій) мають більш стабільні теплофізичні властивості, які монотонно

залежать тільки від температури. Залежно від типу пасивного вогнезахисного матеріалу значення коефіцієнта теплопровідності може бути від 0,1 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) [8; 14–15]. Під час розрахунків теплового стану сталевих конструкцій з пасивними

вогнезахисними матеріалами їхню питому теплоємність і густину також зазвичай приймають сталими [2–3]. Приклад теплового стану таких двох захищених сталевих конструкцій з однаковою товщиною вогнезахисного покриття, яка складає 15 мм, і різним коефіцієнтом

поперечного перерізу в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму наведено на рис. 2 [6]. Залежність температури сталі для цих конструкцій має монотонно зростаючий характер, без наявності точок перегину.

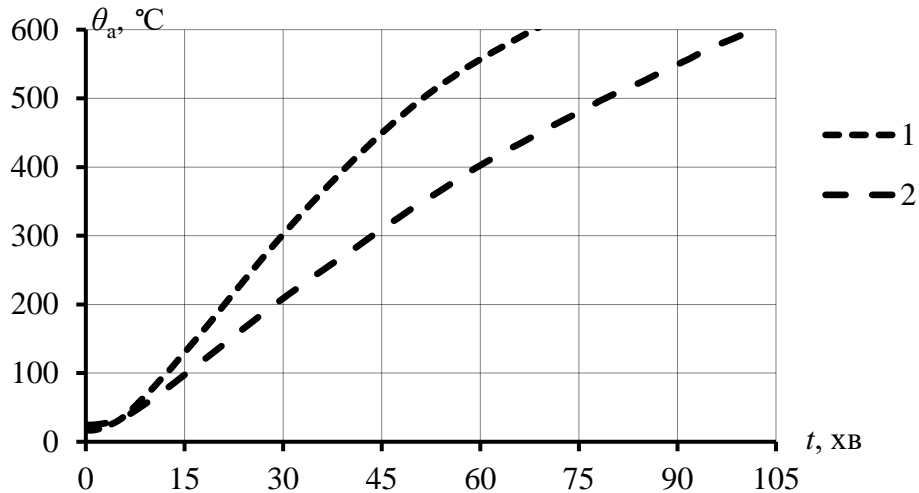


Рисунок 2 – Залежність температури сталі від тривалості вогневого впливу за стандартного температурного режиму для сталевих конструкцій з пасивним вогнезахисним матеріалом і різним коефіцієнтом поперечного перерізу: 1 –  $A_m/V = 200 \text{ м}^{-1}$ , 2 –  $A_m/V = 100 \text{ м}^{-1}$  [6]

Джерело: розроблено авторами

Характер залежності температури сталевих конструкцій з комбінованою системою вогнезахисту, для якої реактивне покриття наносять на зовнішню поверхню пасивного матеріалу, від тривалості вогневого впливу за стандартного температурного режиму є таким же, як і для сталевих конструкцій з пасивною системою вогнезахисту [6]. Відмінністю між тепловими станами сталевих конструкцій із зазначеними системами вогнезахисту, які мають однакову товщину покриття, є збільшення проміжку часу збереженості вогнестійкості для конструкцій з комбінованою системою порівняно з пасивною системою вогнезахисту.

У роботі [7] за проведеним дослідженням визначено особливості залежності температури сталевих колон двотаврового профілю із системою вогнезахисту, в якій застосовано вогнезахисне покриття поверхні колони і

вогнезахисний екран коробчастої форми з оцинкованої сталі завтовшки 0,5 мм, від тривалості вогневого впливу за стандартного температурного режиму. За результатами зазначеного дослідження встановлено ефективність застосування вогнезахисних екранів із вогнезахисним покриттям на його поверхні і без нього для підвищення вогнестійкості сталевих колон.

Наведені вище результати досліджень дають змогу обґрунтовано підходити до визначення параметрів складових систем вогнезахисту для сталевих конструкцій, в яких використовують вогнезахисні матеріали конкретних торговельних марок. У цих дослідженнях розглянуто тепловий стан сталевих конструкцій, оснащених конкретними типами вогнезахисних матеріалів, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму, однак в їх результатах немає даних щодо впливу теплофізичних властивостей

вогнезахисних матеріалів на цей тепловий стан. Також немає даних стосовно залежностей між необхідною мінімальною товщиною вогнезахисного покриття (або облицювання) теплофізичними властивостями застосованих вогнезахисних матеріалів і параметрами сталевих конструкцій (коефіцієнтом поперечного перерізу, критичною температурою сталі й проміжком часу збереженості вогнестійкості). Через брак таких даних не можна проводити оптимізацію параметрів систем вогнезахисту сталевих колон, наприклад за масо-габаритним критерієм (мінімізація маси та/або товщини системи вогнезахисту). Така невизначеність зумовила проведення дослідження впливу теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, на тепловий стан сталевих колон в умовах стандартного температурного режиму.

### Формулювання цілей

**досліджень.** За мету ставилось визначення залежностей між необхідною мінімальною товщиною систем вогнезахисту, теплофізичними властивостями вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, критичною температурою сталі, коефіцієнтом поперечного перерізу і проміжком часу збереженості вогнестійкості сталевих колон. Для її досягнення було поставлено такі завдання:

- визначити системи вогнезахисту сталевих колон, які підлягають дослідженню;

- визначити теплофізичні властивості вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, діапазони критичної температури сталі, коефіцієнт поперечного перерізу і проміжком часу збереженості вогнестійкості сталевих колон, що застосовані у дослідженні;

- розробити процедуру визначення залежностей необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття від теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту,

критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжком часу збереженості вогнестійкості сталевих колон;

- для обраних діапазонів теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжком часу збереженості вогнестійкості сталевих колон визначити дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисних покриттів для досліджуваних систем вогнезахисту, узагальнити отримані розрахункові дані і з'ясувати залежності цієї товщини від теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів і зазначених вище параметрів сталевих колон та проаналізувати їх.

**Методи дослідження.** Застосовано метод дослідження, складовими якого є обчислювальні процедури чисельного моделювання теплового стану сталевих колон, оснащених вогнезахисними матеріалами із заданими теплофізичними властивостями, в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму, операції аналізу, порівняння, узагальнення та систематизації отриманих розрахункових даних. Для розрахунку теплового стану захищених сталевих колон в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму використано однірні математичні моделі теплопровідності. Для сталевих колон з одним шаром вогнезахисного покриття (або облицювання) ця модель складається з такої системи рівнянь:

$$c_a \rho_a \frac{\partial \theta_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_a \frac{\partial \theta_a}{\partial x} \right); \quad (2)$$

$$0 < x < x_1; \theta_a = \theta_a(x, t);$$

$$c_p \rho_p \frac{\partial \theta_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} \right); \quad (3)$$

$$x_1 < x < x_2; \theta_p = \theta_p(x, t);$$

– початкова умова:

$$\theta_a(x, 0) = \theta_p(x, 0) = \theta_0; \quad (4) \quad \lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} = \alpha^* (\theta_t - \theta_{p,s}); \quad (5)$$

– гранична умова на обігрівній поверхні вогнезахисного покриття, за  $x = x_2$ :

$$\alpha^* = \alpha_c + \Phi \varepsilon_{p,s} \varepsilon_f \sigma [(\theta_t + 273)^4 - (\theta_{p,s} + 273)^4] / (\theta_t - \theta_{p,s}); \quad (6)$$

$$\theta_t = 20 + 3451 \lg(0,133t + 1); \quad (7)$$

– гранична умова на поверхні колони, за  $x = x_1$ :

$$\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} = \lambda_a \frac{\partial \theta_a}{\partial x}; \quad (8)$$

$$\theta_a = \theta_p; \quad (9)$$

– гранична умова в точці теплової симетрії сталеві колони, за  $x = 0$ :

$$\frac{\partial \theta_a}{\partial x} = 0, \quad (10)$$

де  $x$  – координата, м;

$x_1$  – координата поверхні колони, м;

$x_2$  – координата обігрівної (зовнішньої) поверхні вогнезахисного покриття, м;

$t$  – тривалість вогневого впливу, с;

$\alpha_c$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією на обігрівній поверхні вогнезахисного покриття, який становить 25 Вт/(м<sup>2</sup>·°C) [16–17];

$\alpha^*$  – сумарний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією та тепловим випромінюванням на обігрівній поверхні вогнезахисного покриття, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);

$\Phi$  – кутовий коефіцієнт, який становить 1,0 [16–17];

$\varepsilon_{p,s}$  – коефіцієнт теплового випромінювання обігрівної поверхні вогнезахисного покриття, який становить 0,8 [16–17];

$\varepsilon_f$  – коефіцієнт теплового випромінювання нагрівального газового середовища, який становить 1,0 [16–17];

$\sigma$  – стала Стефана Больцмана, 5,67·10<sup>-8</sup> Вт/(м<sup>2</sup>·°C<sup>4</sup>);

$\theta_a$  – температура сталі, °C;

$\theta_p$  – температура вогнезахисного покриття, °C;

$\theta_t$  – температура нагрівального газового середовища за стандартного температурного режиму, °C;

$\theta_{p,s}$  – температура обігрівної (зовнішньої) поверхні вогнезахисного покриття, °C;

$\theta_0$  – початкова температура, яка становить 20 °C [16–17];

$c_a$  – питома теплоємність сталі, Дж/(кг·°C);

$c_p$  – питома теплоємність вогнезахисного матеріалу, Дж/(кг·°C);

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

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

$\lambda_a$  – коефіцієнт теплопровідності сталі, Вт/(м·°C);

$\lambda_p$  – коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного матеріалу, Вт/(м·°C).

Для сталевих колон із системами вогнезахисту, які містять вогнезахисний екран, математична модель складається із

системи рівнянь, яка є аналогічною (2) – (10) та має додаткові рівняння теплопровідності для інших вогнезахисних

шарів цих систем і відповідні граничні умови між ними. Розв'язання математичної моделі виконано методом кінцевих різниць за неявною схемою апроксимації і використанням пакета прикладних програм FRIEND [18].

**Виклад основного матеріалу.** Для дослідження було обрано такі чотири системи вогнезахисту сталевих колон:

- система вогнезахисту із вогнезахисним покриттям на поверхні колони (далі – система *A*, рис. 3);

- система вогнезахисту, яка складається із вогнезахисного покриття на поверхні колони і вогнезахисного екрана без вогнезахисного покриття (далі – система *B*, рис. 3);

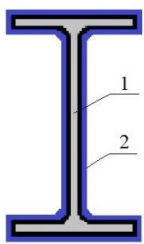
- система вогнезахисту, яка складається із вогнезахисного екрана із вогнезахисним покриттям на його

зовнішній поверхні (далі – система *C*, рис. 3);

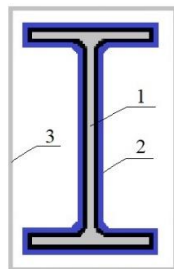
- система вогнезахисту, яка складається із вогнезахисного покриття на поверхні колони і вогнезахисного екрана із вогнезахисним покриттям на його зовнішній поверхні (далі – система *D*, рис. 3).

У системах *B*, *C*, *D* застосовано вогнезахисні екрани коробчастого профілю зі сталі завтовшки 0,5 мм.

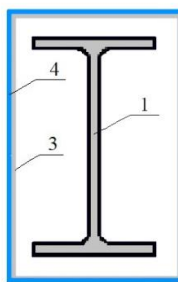
Вибір зазначених систем вогнезахисту обґрунтовано тим, що їхнє застосування під час дослідження дає змогу визначити вплив кожного компонента систем вогнезахисту на тепловий стан сталевих колон, проміжок часу збереженості їхньої вогнестійкості та необхідну мінімальну товщину цих компонентів.



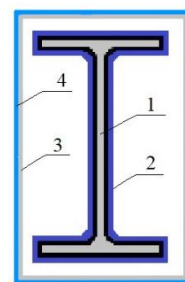
Система А



Система В



Система С



Система D

*Рисунок 3* – Системи вогнезахисту сталевих колон. 1 – сталева колона; 2 – вогнезахисне покриття поверхні колони; 3 – вогнезахисний екран; 4 – вогнезахисне покриття зовнішньої поверхні екрану

*Джерело:* розроблено авторами

Обрані діапазони теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів, які є компонентами зазначених систем вогнезахисту сталевих колон і застосовні під час чисельного моделювання теплового стану сталевих колон, були такими. Мінімальне і максимальне значення коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу становили:  $\lambda_{p,min} = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\lambda_{p,max} = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ . Розрахунки теплового стану захищених сталевих колон в умовах вогневого впливу за стандартного температурного режиму проводили за сталим, незалежним від

температури та інших параметрів, значенням коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу. Було проведено три групи розрахунків, в одній з них цим сталим значенням було  $\lambda_{p,min}$ , в другій –  $\lambda_{p,max}$ , в третій – проміжне значення  $\lambda_{p,med} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ . Значення питомої теплоємності вогнезахисного матеріалу приймали таким, як зазначено в [2–3],  $c_p = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ . Густина вогнезахисного матеріалу також вважали сталою величиною, незалежною від температури та інших параметрів,  $\rho_p = 500 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Діапазони критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих колон, які можна застосувати під час дослідження, були обрані такими. Мінімальне і максимальне значення критичної температури сталі:  $\theta_{cr,min} = 350^\circ\text{C}$ ;  $\theta_{cr,max} = 700^\circ\text{C}$ . Мінімальне і максимальне значення коефіцієнта поперечного перерізу:  $(A_m/V)_{min} = 40 \text{ м}^{-1}$ ;  $(A_m/V)_{max} = 300 \text{ м}^{-1}$ . Для діапазону проміжку часу збереженості вогнестійкості:  $t_{fr,min} = 30 \text{ хв}$ ;  $t_{fr,max} = 240 \text{ хв}$ . Також для розрахунків теплового стану захищених сталевих колон застосовували такі проміжні значення:  $\theta_{cr,med} = 500^\circ\text{C}$ ;  $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$ ;  $t_{fr,med} = 90 \text{ хв}$ .

Процедуру визначення залежностей між необхідною мінімальною товщиною систем вогнезахисту, теплофізичними властивостями вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, критичною температурою сталі, коефіцієнтом поперечного перерізу і проміжком часу збереженості вогнестійкості сталевих колон було обрано такою. Для системи вогнезахисту, яку досліджують, шляхом багаторазового розв'язання прямої задачі теплопровідності визначають дані щодо необхідної мінімальної товщини певного вогнезахисного покриття  $d_{p,min}$ , за якої для тривалості вогневого впливу, що відповідає проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr}$ , розрахункова температура сталевій колоні  $\theta_{a,cal}$  із коефіцієнтом поперечного

перерізу  $A_m/V$  відповідає критичній температурі сталі  $\theta_{cr}$ . Для систем  $A$  і  $B$  цим вогнезахисним покриттям є покриття поверхні колони, а для систем  $C$ ,  $D$  – покриття зовнішньої поверхні екрана.

Для визначення товщини  $d_{p,min}$  задають її початкову наближену величину  $d_{p,0}$ . Розв'язанням прямої задачі теплопровідності із використанням одновимірної математичної моделі, наприклад, (2) – (10) для системи  $A$ , визначають температуру  $\theta_{a,cal}$  на сталевій поверхні колони, за  $x = x_1$ . Визначають різницю між температурами  $\theta_{a,cal}$  і  $\theta_{cr}$ . Якщо ця різниця знаходиться поза межами  $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , то задають інше наближення товщини  $d_{p,0} + \Delta d$  і розв'язанням задачі теплопровідності розраховують нове значення  $\theta_{a,cal}$ . Ітераційний процес завершують за виконання умови щодо отримання зазначеної вище різниці між температурами  $\theta_{a,cal}$  і  $\theta_{cr}$ .

Такі розрахунки товщини  $d_{p,min}$  проводять для всіх вказаних вище значень теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів, які є компонентами систем вогнезахисту, зокрема для  $\lambda_{p,min}$ ,  $\lambda_{p,med}$ ,  $\lambda_{p,max}$ , критичної температури сталі, коефіцієнта поперечного перерізу і проміжку часу збереженості вогнестійкості колон. У табл. 1 наведено варіанти розрахунків товщини  $d_{p,min}$  для системи  $A$ , які застосовані для  $\lambda_{p,min}$  і  $t_{fr,min}$ .

Таблиця 1 – Варіанти розрахунків товщини  $d_{p,min}$  для системи  $A$ , застосовні для  $\lambda_{p,min} = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  і  $t_{fr,min} = 30 \text{ хв}$

№ варіанта	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda_p, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	Коефіцієнт поперечного перерізу $A_m/V, \text{ м}^{-1}$	Критична температура $\theta_{cr}, \text{ }^\circ\text{C}$	Проміжок часу збереженості вогнестійкості $t_{fr}, \text{ хв}$
A1	0,02	40	350	30
A2	0,02	150	350	30
A3	0,02	300	350	30
A4	0,02	40	500	30
A5	0,02	150	500	30
A6	0,02	300	500	30
A7	0,02	40	750	30
A8	0,02	150	750	30
A9	0,02	300	750	30



Загальна кількість варіантів для всіх значень коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного матеріалу і проміжку часу збереженості вогнестійкості колон для цієї системи становить 81.

Аналогічні варіанти розрахунків товщини  $d_{p,min}$  застосовні як для системи В (з вогнезахисним екраном без вогнезахисного покриття), так і системи С (з вогнезахисним екраном із вогнезахисним покриттям на його зовнішній поверхні). Для системи D, яка складається із вогнезахисного покриття на поверхні колони і вогнезахисного екрана із вогнезахисним покриттям на його зовнішній поверхні, є такі відмінності. Для системи D розрахунки необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття на зовнішній поверхні вогнезахисного екрана  $d_{p,min,mem}$  проводять за заданими різними значеннями товщини вогнезахисного покриття на поверхні колони  $d_{p,col}$ . Величину  $d_{p,col}$  задають такою, що дорівнює половині значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття на зовнішній поверхні вогнезахисного покриття  $d_{p,min}$ , отриманого для системи В, яка складається із вогнезахисного покриття на поверхні колони і вогнезахисного екрана без вогнезахисного покриття. Значення товщини  $d_{p,col}$  залежить від величин коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття на поверхні колони  $\lambda_{p,col}$ , коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$ , критичної температури  $\theta_{cr}$  і проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr}$ . Процедура розрахунків товщини  $d_{p,min,mem}$  для системи D є такою. Для варіанта D1 задають  $\lambda_{p,col} = \lambda_{p,mem} = \lambda_{p,min}$  (однакові значення для вогнезахисного покриття на поверхні колони і вогнезахисного покриття на зовнішній поверхні екрана),  $(A_m/V)_{min}$ ,  $\theta_{cr,min}$ ,  $t_{fr,min}$ ,  $d_{p,col}$  та розраховують  $d_{p,min,mem,D1}$ . Виконують розрахунки  $d_{p,min,mem}$  для інших варіантів D2 – D9 (аналогічно A2 – A9, табл. 1). За незмінного значення коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття

на поверхні колони  $\lambda_{p,col} = \lambda_{p,min}$  розраховують товщину  $d_{p,min,mem}$  для всіх інших значень коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття на поверхні екрана  $\lambda_{p,mem}$  ( $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,med}$ ,  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,max}$ ) і проміжку часу збереженості вогнестійкості колони  $t_{fr}$ . Кількість варіантів таких розрахунків становить 81. Змінюють величину коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття на поверхні колони з  $\lambda_{p,col} = \lambda_{p,min}$  на  $\lambda_{p,col} = \lambda_{p,med}$  та розраховують 81 значення товщини  $d_{p,min,mem}$ . Аналогічні розрахунки виконують і для іншої величини коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття на поверхні колони, яке становить  $\lambda_{p,col} = \lambda_{p,max}$ . Загальна кількість варіантів розрахунків товщини  $d_{p,min,mem}$  для системи D складає 243.

Під час розрахунків товщини  $d_{p,min}$  для систем В – D (з вогнезахисним екраном) повітряний проміжок між зовнішньою поверхнею колони і внутрішньою поверхнею вогнезахисного екрана моделюють віртуальною стінкою, яка має такі параметри: товщину 0,01 м; значення коефіцієнта теплопровідності, що становить 0,198 Вт/(м·°C), 0,941 Вт/(м·°C), 3,57 Вт/(м·°C) за температури 0 °C, 500 °C, 1000 °C відповідно; об'ємну теплоємність  $c\rho = 1000$  Дж/(м<sup>3</sup>·°C). Ці параметри було отримано за результатами розв'язання оберненої задачі теплопровідності, в якій за вихідні дані використовували значення температури незахищеної сталеві стінки  $\theta_a$  для різної тривалості вогневого впливу  $t$  за стандартного температурного режиму. Ці вихідні дані одержані шляхом розв'язання прямої задачі теплопровідності із застосуванням рівнянь (2), (4) – (7), (10). Під час розв'язання оберненої задачі теплопровідності визначали значення коефіцієнта теплопровідності віртуальної стінки, за яких середньоквадратичне відхилення величин розрахункової температури незахищеної сталеві стінки від вихідних даних щодо цієї температури  $\theta_a$  є мінімальним [18]. Отримане значення

цього відхилення, що становить  $1,2 \cdot ^\circ\text{C}$ , свідчить про прийнятність для розрахунків наведених вище параметрів віртуальної стінки, яка моделює проміжок між зовнішньою поверхнею колони і внутрішньою поверхнею вогнезахисного екрану.

Результати розрахунків товщини  $d_{p,min}$  для систем *A*, *B*, *C* наведено в табл. 2–4. Із аналізу цих даних випливає наявність для цих систем суттєвої залежності товщини  $d_{p,min}$  від коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття  $\lambda_p$ , коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$ , критичної температури  $\theta_{cr}$  і проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr}$ . З підвищенням  $\lambda_p$ ,  $A_m/V$ ,  $t_{fr}$  та зменшенням  $\theta_{cr}$  товщина  $d_{p,min}$  збільшується.

Так, для системи *A* за  $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

$t_{fr,med} = 90$  хв і підвищенні  $\lambda_p$  від  $0,02 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$  до  $2,0 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$  товщина  $d_{p,min,A}$  збільшується: від  $1,13 \text{ мм}$  до  $88,0 \text{ мм}$  – для  $(A_m/V)_{min} = 40 \text{ м}^{-1}$ ; від  $4,26 \text{ мм}$  до  $161 \text{ мм}$  – для  $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$ ; від  $7,74 \text{ мм}$  до  $184 \text{ мм}$  – для  $(A_m/V)_{max} = 300 \text{ м}^{-1}$  (рис. 4а). За  $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$ ,  $t_{fr,med} = 90$  хв і підвищенні  $\lambda_p$  від  $0,02 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$  до  $2,0 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$  товщина  $d_{p,min,A}$  збільшується: від  $1,99 \text{ мм}$  до  $108 \text{ мм}$  – для  $\theta_{cr,max} = 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ; від  $4,26 \text{ мм}$  до  $161 \text{ мм}$  – для  $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ ; від  $7,28 \text{ мм}$  до  $208 \text{ мм}$  – для  $\theta_{cr,min} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 4б). За  $(A_m/V)_{min} = 150 \text{ м}^{-1}$ ,  $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  і підвищенні  $\lambda_p$  від  $0,02 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$  до  $2,0 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$  товщина  $d_{p,min,A}$  збільшується: від  $0,96 \text{ мм}$  до  $55,3 \text{ мм}$  – для  $t_{fr,min} = 30$  хв; від  $4,26 \text{ мм}$  до  $161 \text{ мм}$  – для  $t_{fr,med} = 90$  хв; від  $13,2 \text{ мм}$  до  $331 \text{ мм}$  – для  $t_{fr,max} = 240$  хв (рис. 4в).

Таблиця 2 – Результати розрахунків товщини  $d_{p,min}$  для системи *A*

$A_m/V$ , $\text{м}^{-1}$	$\lambda_p$ , $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	Товщина $d_{p,min,A}$ (в мм) для:								
		$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,max}$
40	0,02	0,44	0,17	–	2,07	1,13	0,49	6,75	3,94	1,98
150	0,02	1,89	0,96	0,29	7,28	4,26	1,99	20,2	13,2	7,15
300	0,02	3,64	1,97	0,68	12,1	7,74	3,90	28,7	20,8	12,7
40	0,2	4,25	1,64	–	19,4	11,1	4,83	56,5	35,9	19,1
150	0,2	15,8	8,78	2,80	48,1	33,0	17,8	105	80,4	53,2
300	0,2	24,3	15,4	6,20	61,3	46,1	28,8	122	98,1	71,5
40	2,0	35,4	14,8	–	135	88,0	43,8	311	233	149
150	2,0	83,6	55,3	22,3	208	161	108	404	331	251
300	2,0	101	73,3	38,5	229	184	132	427	356	279

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3 – Результати розрахунків товщини  $d_{p,min}$  для системи *B*

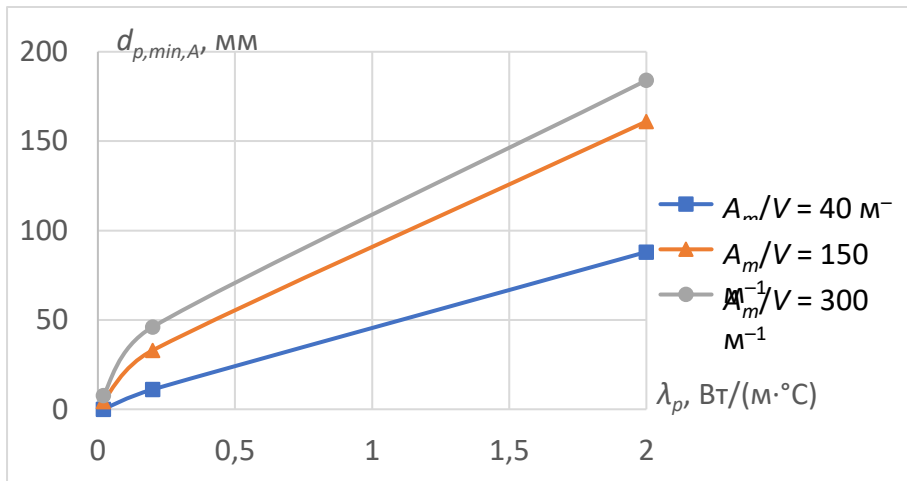
$A_m/V$ , $\text{м}^{-1}$	$\lambda_p$ , $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	Товщина $d_{p,min,B}$ (в мм) для:								
		$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,max}$
40	0,02	0,264	–	–	1,98	1,05	0,40	6,69	3,87	1,91
150	0,02	1,74	0,82	0,16	7,14	4,16	1,91	20,1	13,1	7,07
300	0,02	3,46	1,82	0,56	12,0	7,63	3,71	28,6	20,7	12,7
40	0,2	2,57	–	–	18,5	10,1	3,97	55,6	35,2	18,4
150	0,2	14,3	7,39	1,51	47,0	32,0	16,9	104	79,6	52,5
300	0,2	22,7	14,0	4,96	60,2	45,0	27,9	121	97,3	70,8
40	2,0	19,9	–	–	125	79,1	35,2	303	226	142
150	2,0	70,3	42,5	10,8	198	152	98,9	396	323	243
300	2,0	87,5	60,6	27,5	219	174	123	419	348	272

Джерело: розроблено авторами

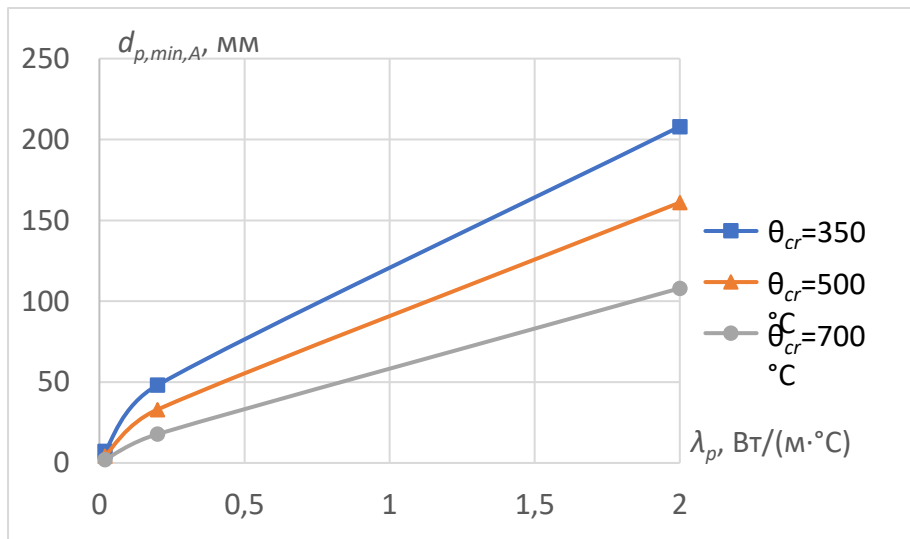
Таблиця 4 – Результати розрахунків товщини  $d_{p,min}$  для системи С

$A_m/V$ , $M^{-1}$	$\lambda_p$ , $BT/(M \cdot ^\circ C)$	Товщина $d_{p,min,C}$ (в мм) для:								
		$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,max}$
40	0,02	0,15	–	–	1,68	0,84	0,31	6,19	3,55	1,73
150	0,02	1,42	0,63	0,12	6,47	3,69	1,69	18,8	12,2	6,56
300	0,02	2,88	1,47	0,44	10,8	6,72	3,28	26,9	19,0	11,4
40	0,2	1,43	–	–	15,8	8,17	3,05	52,5	32,7	16,8
150	0,2	12,2	5,95	1,12	44,3	29,6	15,3	102	77,0	50,0
300	0,2	20,6	12,2	4,18	57,5	42,5	25,6	118	94,6	68,0
40	2,0	12,4	–	–	112	67,8	28,4	292	217	135
150	2,0	67,1	40,2	9,78	195	150	97,8	393	322	242
300	2,0	89,1	62,8	28,9	220	175	125	420	348	273

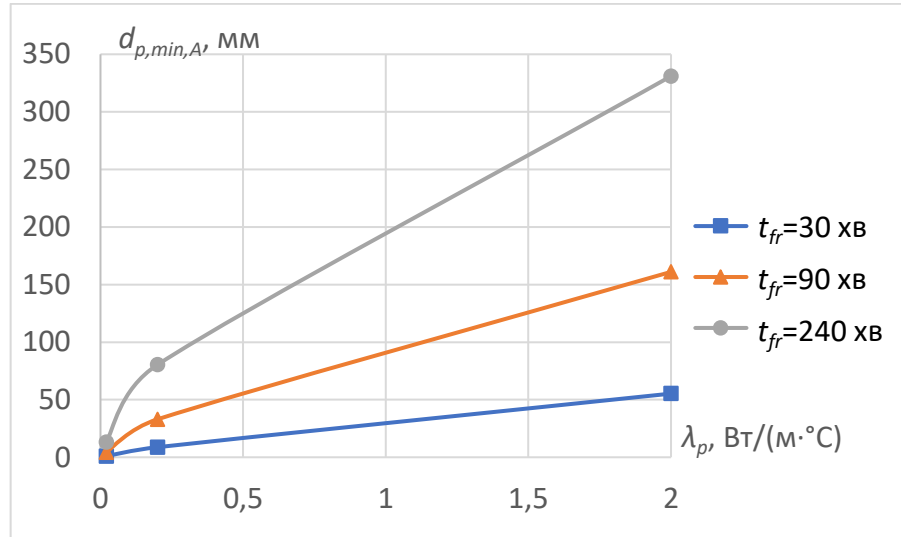
Джерело: розроблено авторами



а



б



В

Рисунок 4 – Залежність товщини  $d_{p,min,A}$  від коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_p$  і коефіцієнта поперечного перерізу (а), критичної температури сталі (б), проміжку часу збереженості вогнестійкості сталеві колони (в) для  $\theta_{cr,med} = 500^\circ\text{C}$ ,  $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$ ,  $t_{fr,med} = 90 \text{ хв}$

Джерело: розроблено авторами

У табл. 5 наведено дані щодо різниці  $\Delta_{d,AB}$  між значенням товщини покриття  $d_{p,min,A}$  (табл. 2), отриманим для системи А, і значенням товщини покриття  $d_{p,min,B}$  (табл. 3), отриманим для системи В. У цій же таблиці надано дані щодо величини

відповідної відносної різниці  $\delta_{d,AB}$ , яку визначено за такою формулою:

$$\delta_{d,AB} = 100\Delta_{d,AB} / d_{p,min,A}, \quad (11)$$

де  $\Delta_{d,AB} = d_{p,min,A} - d_{p,min,B}$ , мм.

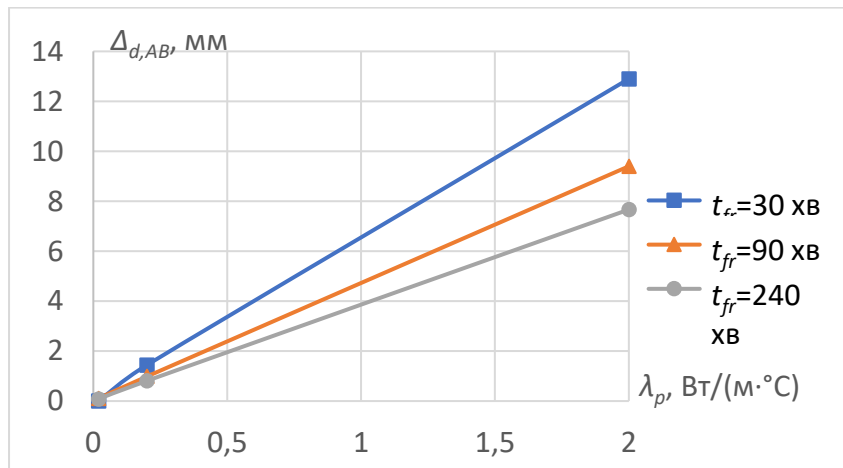
Таблиця 5 – Дані щодо різниць  $\Delta_{d,AB}$  і  $\delta_{d,AB}$

$A_m/V$ , $\text{м}^{-1}$	$\lambda_p$ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	Значення $\Delta_{d,AB}$ (в мм) / $\delta_{d,AB}$ (в %) для:								
		$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,max}$
40	0,02	0,17 / 38,6	- / -	- / -	0,09 / 4,35	0,08 / 7,08	0,09 / 18,4	0,06 / 0,89	0,07 / 1,78	0,07 / 3,54
150	0,02	0,15 / 7,94	0,14 / 14,6	0,13 / 44,8	0,14 / 1,92	0,10 / 2,35	0,08 / 4,02	0,1 / 0,50	0,1 / 0,76	0,08 / 1,12
300	0,02	0,18 / 4,95	0,15 / 7,61	0,12 / 17,7	0,10 / 0,83	0,11 / 1,42	0,19 / 4,87	0,1 / 0,35	0,1 / 0,48	0,1 / 0,79
40	0,2	1,68 / 39,5	- / -	- / -	0,9 / 4,64	1 / 9,01	0,86 / 17,8	0,9 / 1,59	0,7 / 1,95	0,7 / 3,66
150	0,2	1,50 / 9,49	1,39 / 15,8	1,29 / 46,1	1,1 / 2,29	1 / 3,03	0,9 / 5,06	1 / 0,95	0,8 / 1,00	0,7 / 1,32
300	0,2	1,60 / 6,58	1,40 / 9,09	1,24 / 20,0	1,1 / 1,79	1,1 / 2,39	0,9 / 3,13	1 / 0,82	0,8 / 0,82	0,7 / 0,98
40	2,0	15,5 / 43,8	- / -	- / -	10 / 7,41	8,9 / 10,1	8,6 / 19,6	8 / 2,57	7 / 3,00	7 / 4,70
150	2,0	13,3 / 15,9	12,8 / 23,2	11,5 / 51,6	10 / 4,81	9 / 5,59	9,1 / 8,43	8 / 1,98	8 / 2,42	8 / 3,19
300	2,0	13,5 / 13,4	12,7 / 17,3	11,0 / 28,6	10 / 4,37	10 / 5,43	9 / 6,82	8 / 1,87	8 / 2,25	7 / 2,51

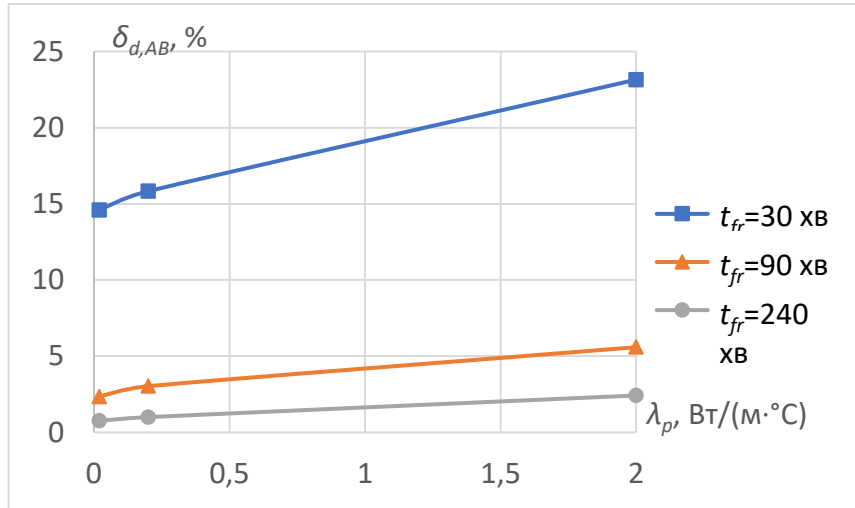
Із аналізу цієї таблиці випливає, що різниця  $\Delta_{d,AB}$  змінюється в діапазоні від 0,06 мм до 15,5 мм. Вона має найбільші значення для  $\lambda_{p,max} = 2,0$  Вт/(м·°С) і  $t_{fr,min} = 30$  хв, найменші – для  $\lambda_{p,min} = 0,02$  Вт/(м·°С) і  $t_{fr,max} = 240$  хв. Значення цієї різниці суттєво залежить від  $\lambda_p$  і  $t_{fr}$ , а її залежність від  $A_m/V$  і  $\theta_{cr}$  є малою. З підвищенням  $\lambda_p$  різниця  $\Delta_{d,AB}$  монотонно збільшується, а з підвищенням  $t_{fr}$  вона зменшується. Так, з підвищенням  $\lambda_p$  від 0,02 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) середнє значення різниці  $\Delta_{d,AB}$ , визначене для певної величини  $t_{fr}$ , збільшується: від 0,15 мм до 12,9 мм – для  $t_{fr,min} = 30$  хв; від 0,11 мм до 9,4 мм – для  $t_{fr,med} = 90$  хв; від 0,09 мм до 7,7 мм – для  $t_{fr,max} = 240$  хв (рис. 5а).

Відносна різниця  $\delta_{d,AB}$  змінюється в діапазоні від 0,35 % до 51,6 %. Вона має найбільші значення для  $\lambda_{p,max} = 2,0$  Вт/(м·°С) і  $t_{fr,min} = 30$  хв, найменші – для  $t_{fr,max} = 240$  хв. Значення цієї різниці, крім  $\lambda_p$  і  $t_{fr}$ , також залежить від  $A_m/V$  і  $\theta_{cr}$ . Вона збільшується з підвищенням  $\lambda_p$ ,  $\theta_{cr}$  і зменшується з підвищенням  $A_m/V$  і  $t_{fr}$ .

Вплив  $\lambda_p$  на цю різницю не такий значний, як на  $\Delta_{d,AB}$ . Так, для  $(A_m/V)_{med} = 150$  м<sup>-1</sup> і  $\theta_{cr,med} = 500$  °С з підвищенням  $\lambda_p$  від 0,02 Вт/(м·°С) до 2,0 Вт/(м·°С) відносна різниця збільшується: від 14,6% до 23,2% – для  $t_{fr,min} = 30$  хв; від 2,35% до 5,59% – для  $t_{fr,med} = 90$  хв; від 0,76% до 2,42 % – для  $t_{fr,max} = 240$  хв (рис. 5б). Також, як і  $t_{fr}$ , на відносну різницю суттєво впливають  $A_m/V$  і  $\theta_{cr}$ . Так, для  $t_{fr,min} = 30$  хв і  $\theta_{cr,min} = 350$  °С з підвищенням  $A_m/V$  з 40 м<sup>-1</sup> до 300 м<sup>-1</sup> різниця  $\delta_{d,AB}$  зменшується: від 38,6% до 4,95% – для  $\lambda_{p,min} = 0,02$  Вт/(м·°С); від 39,5% до 6,58% – для  $\lambda_{p,med} = 0,2$  Вт/(м·°С); від 43,8% до 13,4% – для  $\lambda_{p,max} = 2,0$  Вт/(м·°С) (табл. 5). Для  $t_{fr,min} = 30$  хв і  $(A_m/V)_{med} = 150$  м<sup>-1</sup> з підвищенням  $\theta_{cr}$  з 350 °С до 700 °С різниця  $\delta_{d,AB}$  збільшується: від 7,94% до 44,8% – для  $\lambda_{p,min} = 0,02$  Вт/(м·°С); від 9,49% до 46,1% – для  $\lambda_{p,med} = 0,2$  Вт/(м·°С); від 15,9% до 51,6% – для  $\lambda_{p,max} = 2,0$  Вт/(м·°С) (табл. 5). З підвищенням  $t_{fr}$  вплив  $A_m/V$  і  $\theta_{cr}$  на відносну різницю  $\delta_{d,AB}$  значно зменшується.



а



б

Рисунок 5 – Залежність різниць  $\Delta_{d,AB}$  (а) і  $\delta_{d,AB}$  (б) від коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_p$  для різних значень проміжку часу  $t_{fr}$

Джерело: розроблено авторами

У табл. 6 наведено дані щодо різниці  $\Delta_{d,BC}$  між значенням товщини покриття  $d_{p,min,B}$  (табл. 3), отриманим для системи B, і значенням товщини покриття  $d_{p,min,C}$  (табл. 4), отриманим для системи C. В цій же таблиці надано дані щодо величини

відповідної відносної різниці  $\delta_{d,BC}$ , яку визначено за такою формулою:

$$\delta_{d,BC} = 100\Delta_{d,BC} / d_{p,min,B}, \quad (13)$$

де  $\Delta_{d,BC} = d_{p,min,B} - d_{p,min,C}$ , мм

Таблиця 6 – Дані щодо різниць  $\Delta_{d,BC}$  і  $\delta_{d,BC}$

$A_m/V,$ $M^{-1}$	$\lambda_p,$ $Вт/(м \cdot ^\circ C)$	Значення $\Delta_{d,BC}$ (в мм) / $\delta_{d,BC}$ (в %) для:								
		$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min},$ $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med},$ $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max},$ $t_{fr,max}$
40	0,02	0,11 / 43,2	- / -	- / -	0,3 / 15,2	0,21 / 20,0	0,09 / 22,5	0,5 / 7,47	0,32 / 8,27	0,18 / 9,42
150	0,02	0,32 / 18,4	0,19 / 23,2	0,04 / 25,0	0,67 / 9,38	0,47 / 11,3	0,22 / 11,5	1,3 / 6,47	0,9 / 6,87	0,51 / 7,21
300	0,02	0,58 / 16,8	0,35 / 19,2	0,12 / 21,4	1,2 / 10,0	0,91 / 11,9	0,43 / 11,6	1,7 / 5,94	1,7 / 8,21	1,3 / 10,2
40	0,2	1,14 / 44,4	- / -	- / -	2,7 / 14,6	1,93 / 19,1	0,92 / 23,2	3,1 / 5,58	2,5 / 7,10	1,6 / 8,70
150	0,2	2,1 / 14,7	1,44 / 19,5	0,39 / 25,8	2,7 / 5,74	2,4 / 7,50	1,6 / 9,47	2 / 1,92	2,6 / 3,27	2,5 / 4,76
300	0,2	2,1 / 9,25	1,8 / 12,9	0,78 / 15,7	2,7 / 4,49	2,5 / 5,56	2,3 / 8,24	3 / 2,48	2,7 / 2,77	2,8 / 3,95
40	2,0	7,5 / 37,7	- / -	- / -	13 / 10,4	11,3 / 14,3	6,8 / 19,3	11 / 3,63	9 / 3,98	7 / 4,93
150	2,0	3,2 / 4,55	2,3 / 5,41	1,02 / 9,4	3 / 1,52	2 / 1,32	1,1 / 1,11	3 / 0,76	1 / 0,31	1 / 0,41
300	2,0	-1,6 / -1,83	-2,2 / -3,63	-1,4 / -5,09	-1 / -0,46	-1 / -0,57	-2 / -1,63	-1 / -0,24	0 / 0	-1 / -0,37

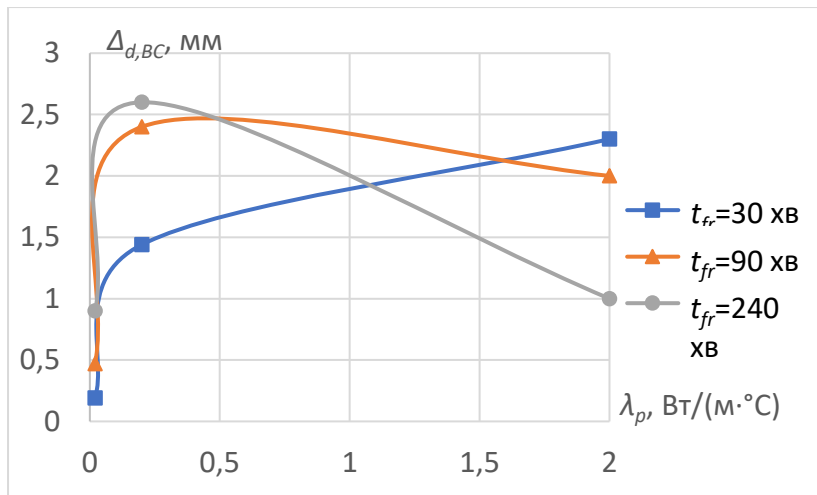
Джерело: розроблено авторами

Із аналізу цієї таблиці випливає, що різниця  $\Delta_{d,BC}$  змінюється в діапазоні від

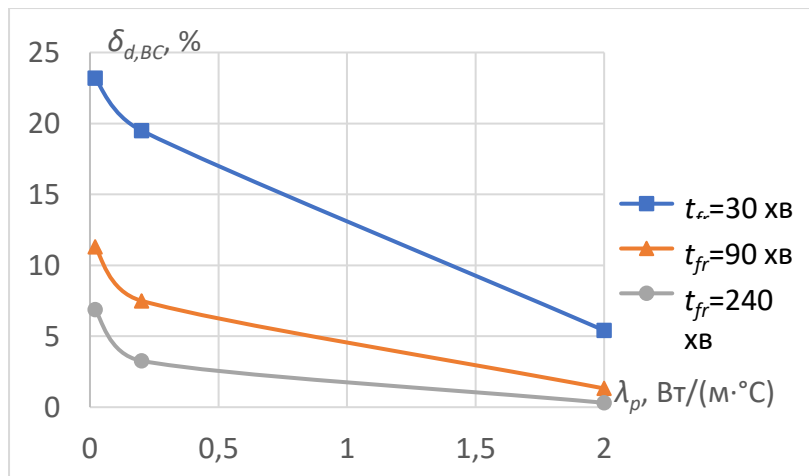
2,2 мм до 13 мм. Найбільші значення вона має для  $(A_m/V)_{min} = 40 \text{ м}^{-1}$  і

$\lambda_{p,max} = 2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$ , найменші – для  $(A_m/V)_{max} = 300 \text{ м}^{-1}$  і  $\lambda_{p,max} = 2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$ . Немає монотонної залежності різниці  $\Delta_{d,BC}$  від  $\lambda_p$  і  $t_{fr}$ . Приклад цього проілюстровано на рис. 6а. З підвищенням  $\lambda_p$  від  $0,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$  до  $0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$  різниця  $\Delta_{d,BC}$  збільшується: від  $0,19 \text{ мм}$  до  $1,44 \text{ мм}$  – для  $t_{fr,min} = 30 \text{ хв}$ ; від  $0,47 \text{ мм}$  до  $2,4 \text{ мм}$  – для  $t_{fr,med} = 90 \text{ хв}$ ; від  $0,90 \text{ мм}$  до  $2,6 \text{ мм}$  – для  $t_{fr,max} = 240 \text{ хв}$ . У разі подальшого підвищення  $\lambda_p$  до  $2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$  різниця  $\Delta_{d,BC}$

для  $t_{fr,min} = 30 \text{ хв}$  збільшується до  $2,3 \text{ мм}$ , а для  $t_{fr,med} = 90 \text{ хв}$  і  $t_{fr,max} = 240 \text{ хв}$  має місце її зменшення до  $2,0 \text{ мм}$  і  $1,0 \text{ мм}$  відповідно. Водночас, якщо для  $\lambda_{p,min} = 0,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$  і  $\lambda_{p,med} = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$  з підвищенням  $t_{fr}$  різниця  $\Delta_{d,BC}$  збільшується, то для  $\lambda_{p,max} = 2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$  вона зменшується. Різниця  $\Delta_{d,BC}$  зменшується з підвищенням  $\theta_{cr}$ . З підвищенням  $A_m/V$  вона зменшується для  $\lambda_{p,max} = 2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$ , а для інших  $\lambda_p$  – збільшується.



а



б

Рисунок 6 – Залежність різниць  $\Delta_{d,BC}$  (а) і  $\delta_{d,BC}$  (б) від коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_p$  для різних значень проміжку часу  $t_{fr}$   
Джерело: розроблено авторами

Відносна різниця  $\delta_{d,BC}$  змінюється в діапазоні від  $5,09 \%$  до  $44,4 \%$ . Вона має найбільші значення для  $(A_m/V)_{min} = 40 \text{ м}^{-1}$ ,  $t_{fr,min} = 30 \text{ хв}$ ,  $\theta_{cr,min} = 350 \text{ °С}$ , а найменші – для  $(A_m/V)_{max} = 300 \text{ м}^{-1}$  і  $\lambda_{p,max} = 2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$ . Ця різниця залежить

від  $\lambda_p$ ,  $A_m/V$ ,  $t_{fr}$  і  $\theta_{cr}$ . Вона зменшується з підвищенням  $\lambda_p$ ,  $A_m/V$ ,  $t_{fr}$  і збільшується з підвищенням  $\theta_{cr}$ . Так, для  $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$  і  $\theta_{cr,med} = 500 \text{ °С}$  з підвищенням  $\lambda_p$  від  $0,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$  до  $2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$  відносна

різниця зменшується: від 23,2% до 5,41% – для  $t_{fr,min} = 30$  хв; від 11,3% до 1,32% – для  $t_{fr,med} = 90$  хв; від 6,87% до 0,31% – для  $t_{fr,max} = 240$  хв (рис. 6б). Для  $t_{fr,min} = 30$  хв і  $\theta_{cr,min} = 350$  °С з підвищенням  $A_m/V$  з  $40$  м<sup>-1</sup> до  $300$  м<sup>-1</sup> різниця  $\delta_{d,AB}$  зменшується: від 43,2% до 16,8% – для  $\lambda_{p,min} = 0,02$  Вт/(м·°С); від 44,4% до 9,25% – для  $\lambda_{p,med} = 0,2$  Вт/(м·°С); від 37,7% до 1,83% – для  $\lambda_{p,max} = 2,0$  Вт/(м·°С) (табл. 6). Для  $t_{fr,min} = 30$  хв і  $(A_m/V)_{med} = 150$  м<sup>-1</sup> з підвищенням  $\theta_{cr}$  з  $350$  °С до  $700$  °С різниця  $\delta_{d,BC}$  збільшується: від 18,4% до 25,0% – для  $\lambda_{p,min} = 0,02$  Вт/(м·°С); від 14,7% до 25,8% – для  $\lambda_{p,med} = 0,2$  Вт/(м·°С); від 4,55% до 9,4% – для  $\lambda_{p,max} = 2,0$  Вт/(м·°С) (табл. 6).

Результати розрахунків необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття на зовнішній поверхні

вогнезахисного екрана  $d_{p,min,mem}$  для системи  $D$  (рис. 3) наведено в табл. 7. У цій же таблиці вказано значення товщини вогнезахисного покриття на поверхні колони  $d_{p,col} = 0,5d_{p,min,B}$ , які застосовували під час цих розрахунків. Згідно з даними цієї таблиці за формулами (14), (15) розраховано необхідну мінімальну товщину вогнезахисту  $d_{p,min,D}$  для системи  $D$  і дані щодо відносної різниці  $\delta_{d,BD}$  між значенням товщини покриття  $d_{p,min,B}$  (табл. 3) для системи  $B$  і значенням товщини вогнезахисту  $d_{p,min,D}$  для системи  $D$ .

$$d_{p,min,D} = d_{p,min,mem} + d_{p,col}; \quad (14)$$

$$\delta_{d,BD} = 100(d_{p,min,B} - d_{p,min,D}) / d_{p,min,B}. \quad (15)$$

Таблиця 7 – Результати розрахунків товщини  $d_{p,min,mem}$  для системи  $D$

$A_m/V$ , м <sup>-1</sup>	$\lambda_{p,mem}$ Вт/(м·°С)	Товщина $d_{p,col}$ (в мм) / $d_{p,min,mem}$ (в мм) для:								
		$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,min}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,med}$	$\theta_{cr,min}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,med}$ , $t_{fr,max}$	$\theta_{cr,max}$ , $t_{fr,max}$
$\lambda_{p,col} = \lambda_{p,min} = 0,02$ Вт/(м·°С)										
40	0,02	0,132 / 0,076	- / -	- / -	0,99 / 0,872	0,525 / 0,439	0,2 / 0,163	3,345 / 3,100	1,935 / 1,80	0,955 / 0,890
150	0,02	0,87 / 0,71	0,41 / 0,324	0,08 / 0,056	3,57 / 3,11	2,08 / 1,79	0,955 / 0,834	10,05 / 8,93	6,55 / 5,74	3,535 / 3,19
300	0,02	1,73 / 1,37	0,91 / 0,73	0,28 / 0,202	6,0 / 4,99	3,815 / 3,17	1,855 / 1,61	14,3 / 12,7	10,35 / 8,87	6,35 / 5,35
40	0,2	0,132 / 0,75	- / -	- / -	0,99 / 8,35	0,525 / 4,32	0,2 / 1,63	3,345 / 27,3	1,935 / 17,0	0,955 / 8,73
150	0,2	0,87 / 6,32	0,41 / 3,09	0,08 / 0,55	3,57 / 23,4	2,08 / 15,4	0,955 / 7,90	10,05 / 53,3	6,55 / 41,6	3,535 / 27,3
300	0,2	1,73 / 10,7	0,91 / 6,43	0,28 / 1,94	6,0 / 30,8	3,815 / 22,9	1,855 / 13,9	14,3 / 64,7	10,35 / 53,2	6,35 / 38,6
40	2,0	0,132 / 6,64	- / -	- / -	0,99 / 62,1	0,525 / 37,4	0,2 / 15,3	3,345 / 159	1,935 / 122	0,955 / 75,0
150	2,0	0,87 / 36,6	0,41 / 22,3	0,08 / 4,92	3,57 / 106	2,08 / 85,9	0,955 / 56,6	10,05 / 213	6,55 / 186	3,535 / 149
300	2,0	1,73 / 48,2	0,91 / 35,8	0,28 / 14,8	6,0 / 121	3,815 / 103	1,855 / 78,1	14,3 / 240	10,35 / 210	6,35 / 173
$\lambda_{p,col} = \lambda_{p,med} = 0,2$ Вт/(м·°С)										
40	0,02	1,285 / 0,08	- / -	- / -	9,25 / 0,85	5,05 / 0,44	1,985 / 0,16	27,8 / 2,94	17,6 / 1,73	9,2 / 0,875
150	0,02	7,15 / 0,67	3,695 / 0,31	0,755 / 0,06	23,5 / 2,65	16,0 / 1,63	8,45 / 0,79	52,0 / 6,84	39,8 / 4,64	26,25 / 2,75
300	0,02	11,35 / 1,19	7,0 / 0,66	2,48 / 0,20	30,1 / 3,78	22,5 / 2,53	13,95 / 1,36	60,5 / 8,57	48,65 / 6,19	35,4 / 3,98
40	0,2	1,285 / 0,75	- / -	- / -	9,25 / 8,13	5,05 / 4,32	1,985 / 1,61	27,8 / 26,4	17,6 / 16,5	9,2 / 8,62
150	0,2	7,15 / 6,06	3,695 / 3,00	0,755 / 0,55	23,5 / 21,7	16,0 / 14,5	8,45 / 7,57	52,0 / 49,8	39,8 / 37,5	26,25 / 24,5
300	0,2	11,35 / 9,89	7,0 / 5,99	2,48 / 1,93	30,1 / 27,9	22,5 / 20,7	13,95 / 12,2	60,5 / 57,7	48,65 / 46,2	35,4 / 32,9



Продовження таблиці 7

40	2,0	1,285 / 6,58	- / -	- / -	9,25 / 61,6	5,05 / 37,2	1,985 / 15,2	27,8 / 161	17,6 / 121	9,2 / 74,1
150	2,0	7,15 / 36,7	3,695 / 22,0	0,755 / 4,9	23,5 / 110	16,0 / 86,0	8,45 / 55,6	52,0 / 226	39,8 / 191	26,25 / 148
300	2,0	11,35 / 49,4	7,0 / 35,5	2,48 / 14,9	30,1 / 127	22,5 / 105	13,95 / 75,3	60,5 / 249	48,65 / 215	35,4 / 174
$\lambda_{p,col} = \lambda_{p,max} = 2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$										
40	0,02	9,95 / 0,02	- / -	- / -	62,5 / 0,71	39,55 / 0,39	17,6 / 0,16	151,5 / 2,11	113 / 1,36	71,0 / 0,76
150	0,02	35,15 / 0,49	21,25 / 0,25	5,4 / 0,05	99 / 1,52	76 / 1,02	49,45 / 0,58	198 / 3,33	161,5 / 2,40	121,5 / 1,6
300	0,02	43,75 / 0,72	30,3 / 0,44	13,75 / 0,17	109,5 / 1,81	87 / 1,27	61,5 / 0,80	209,5 / 3,69	174 / 2,71	136 / 1,89
40	0,2	9,95 / 0,72	- / -	- / -	62,5 / 6,93	39,55 / 3,86	17,6 / 1,53	151,5 / 20,0	113 / 13,2	71,0 / 7,5
150	0,2	35,15 / 4,60	21,25 / 2,46	5,4 / 0,53	99 / 14,1	76 / 9,68	49,45 / 5,62	198 / 30,2	161,5 / 22,5	121,5 / 15,3
300	0,2	43,75 / 6,58	30,3 / 4,13	13,75 / 1,62	109,5 / 16,5	87 / 11,9	61,5 / 7,67	209,5 / 33,0	174 / 25,1	136 / 17,9
40	2,0	9,95 / 6,29	- / -	- / -	62,5 / 56,4	39,55 / 34,3	17,6 / 14,6	151,5 / 145	113 / 107	71,0 / 67,0
150	2,0	35,15 / 32,0	21,25 / 19,4	5,4 / 4,70	99,0 / 93,3	76,0 / 71,6	49,45 / 46,3	198 / 190	161,5 / 157	121,5 / 118
300	2,0	43,75 / 41,5	30,3 / 29,3	13,75 / 13,1	109,5 / 104	87,0 / 83,2	61,5 / 58,9	209,5 / 202	174 / 169	136 / 132

Джерело: розроблено авторами

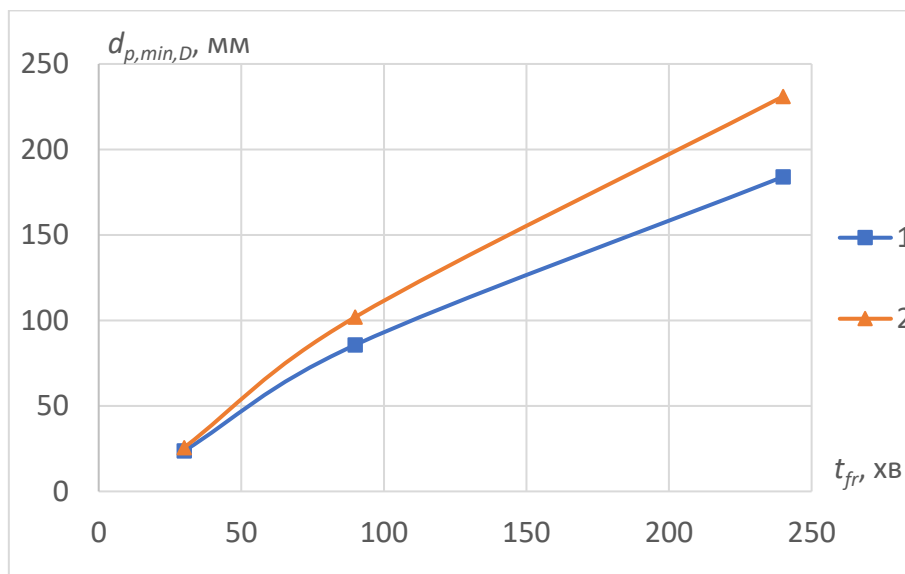


Рисунок 7 – Залежність товщини  $d_{p,min,D}$  від проміжку часу  $t_{fr}$  для: 1 –  $\lambda_{p,met} = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$  і  $\lambda_{p,col} = 2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$ ; 2 –  $\lambda_{p,met} = 2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$  і  $\lambda_{p,col} = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$

Джерело: розроблено авторами

Відносна різниця  $\delta_{d,BD}$  змінюється в діапазоні: від 3 876 % до 21 % – для  $\lambda_{p,col} = 0,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$ ; від -352 % до 47 % – для  $\lambda_{p,col} = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$ ; від 1 % до 50 % – для  $\lambda_{p,col} = 2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$ . Значення цієї

різниці суттєво залежить від комбінації  $\lambda_{p,met}$  і  $\lambda_{p,col}$ . На рис. 8 для  $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$ ,  $\theta_{cr,med} = 500 \text{ °С}$ ,  $t_{fr,med} = 90 \text{ хв}$  наведено залежність різниці  $\delta_{d,BD}$  від  $\lambda_{p,met}$  для різних значень  $\lambda_{p,col}$ .

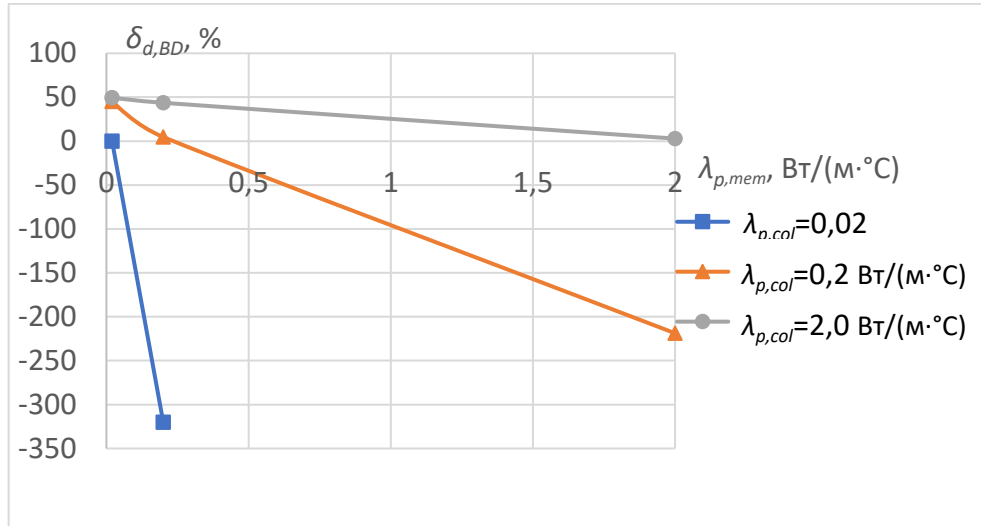


Рисунок 8 – Залежність різниці  $\delta_{d,BD}$  від коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{p,mem}$  для різних значень  $\lambda_{p,col}$

Джерело: розроблено авторами

За абсолютною величиною  $\delta_{d,BD}$  має найменші значення для таких комбінацій:  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 0,02$  Вт/(м·°С) (значення  $\delta_{d,BD}$  від 3 % до 21 %);  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 0,2$  Вт/(м·°С) (значення  $\delta_{d,BD}$  від 2% до 21%);  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 2,0$  Вт/(м·°С) (значення  $\delta_{d,BD}$  від 1% до 18%). На рис. 9 для  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col}$ ,  $(A_m/V)_{med} = 150$  м<sup>-1</sup> і

$\theta_{cr,med} = 500$  °С наведено залежність  $\delta_{d,BD}$  від  $\lambda_{p,mem}$  для різних значень  $t_{fr}$ . Найбільші значення за абсолютною величиною  $\delta_{d,BD}$  має для комбінації  $\lambda_{p,mem} = 2,0$  Вт/(м·°С) і  $\lambda_{p,col} = 0,02$  Вт/(м·°С) (значення  $\delta_{d,BD}$  від 789 % до 3 876%). Також значення різниці  $\delta_{d,BD}$  залежить від  $A_m/V$ ,  $t_{fr}$  і  $\theta_{cr}$ .

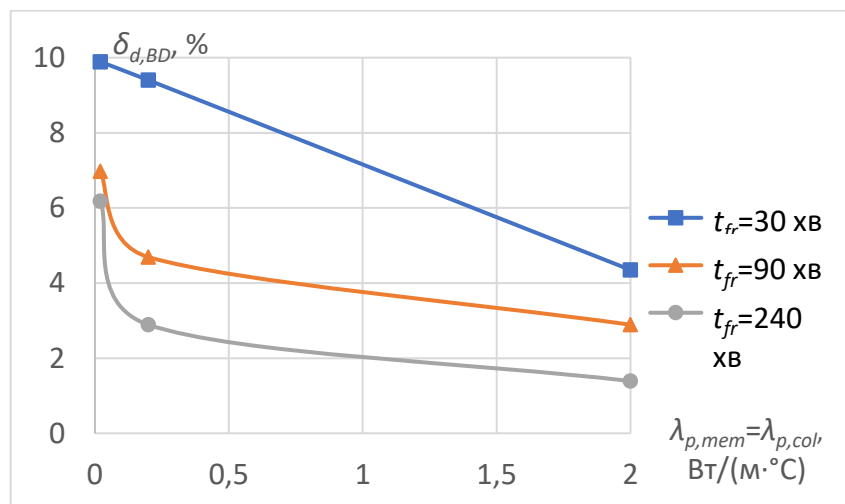


Рисунок 9 – Залежність різниці  $\delta_{d,BD}$  від коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col}$  для різних значень проміжку часу  $t_{fr}$

Джерело: розроблено авторами

Слід зауважити, що дані щодо товщини вогнезахисту  $d_{p,min,D}$  для системи

$D$ , яка складається із вогнезахисного покриття на поверхні колони і

вогнезахисного екрана із вогнезахисним покриттям на його зовнішній поверхні (рис. 3), було отримано для варіантів, коли товщина вогнезахисного покриття на поверхні колони  $d_{p,col}$  становить 50% від товщини  $d_{p,min,B}$  (табл. 3), за якої виконується вимога (1) і немає необхідності у використанні вогнезахисного покриття на зовнішній поверхні екрана (тобто  $d_{p,min,mem} = 0$ ). Якщо співвідношення між  $d_{p,col}$  і  $d_{p,min,B}$  змінити з 50% на інші величини, то і значення товщини вогнезахисту  $d_{p,min,D}$  будуть отримані інші, і вони можуть бути меншими або більшими за ті, які отримані за  $d_{p,col} = 0,5d_{p,min,B}$ . Так, якщо розглядати варіанти, за якими на поверхні колони немає вогнезахисного покриття, то для них співвідношення  $d_{p,col} / d_{p,min,D}$  дорівнює нулю і товщина  $d_{p,min,D}$  відповідає товщині  $d_{p,min,C}$ . Для інших варіантів, якщо немає вогнезахисного покриття на поверхні екрану,  $d_{p,min,D} = d_{p,min,B}$ . На рис. 10, як приклад, для  $(A_m/V)_{med} = 150 \text{ м}^{-1}$ ,  $t_{fr,med} = 90 \text{ хв}$  і  $\theta_{cr,med} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  наведено залежність товщини вогнезахисту  $d_{p,min,D}$  від співвідношення між  $d_{p,col}$  і  $d_{p,min,D}$  для різних комбінацій  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col}$ . Для комбінацій  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  і  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  залежність

товщини вогнезахисту  $d_{p,min,D}$  від співвідношення  $d_{p,col} / d_{p,min,D}$  має монотонно зростаючий характер. З підвищенням  $100d_{p,col}/d_{p,min,D}$  від 0 до 100 % товщина  $d_{p,min,D}$  збільшується від 3,69 мм до 4,16 мм – для  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ , і від 29,6 мм до 32,0 мм – для  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ . Така залежність зумовлена зменшенням рівня температури на внутрішній поверхні екрана з підвищенням товщини вогнезахисного покриття на ньому порівняно з варіантами, для яких цього покриття немає. Тепловий опір повітряного проміжку між екраном і колоною збільшується зі зменшенням рівня температури в ньому. Для комбінації  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  з підвищенням  $100d_{p,col}/d_{p,min,D}$  від 0 до 51,5 % товщина  $d_{p,min,D}$  зменшується від 150 мм до 147 мм, а у разі подальшого підвищення цього співвідношення до 100 % – збільшується до 152 мм. Найменше значення товщини  $d_{p,min,D} = 147 \text{ мм}$  для цієї комбінації зумовлено збільшенням рівня теплового опору повітряного проміжку між екраном і колоною порівняно з варіантами, для яких вогнезахисного покриття немає на поверхні колони або на зовнішній поверхні екрана.

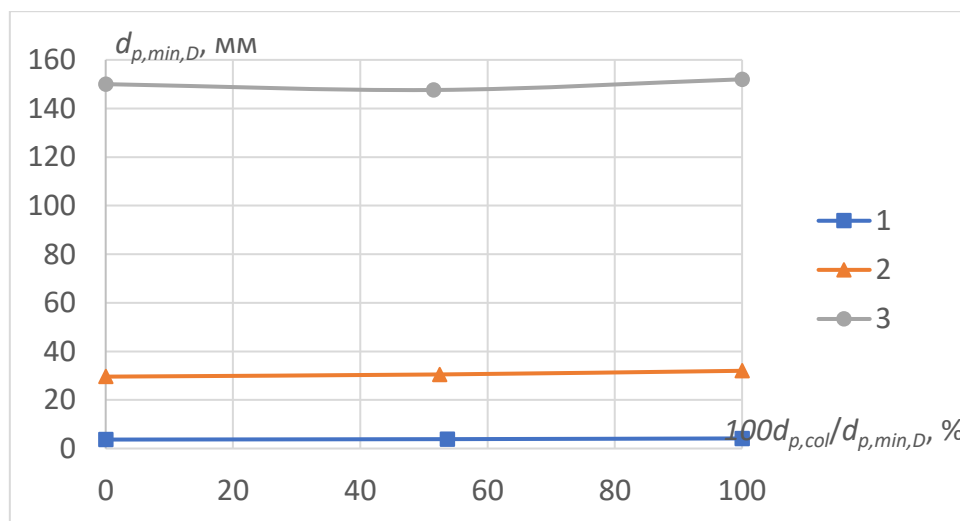


Рисунок 10 – Залежність товщини вогнезахисту  $d_{p,min,D}$  від співвідношення між  $d_{p,col}$  і  $d_{p,min,D}$  для різних комбінацій  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col}$ : 1 –  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 0,02 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ; 2 –  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ; 3 –  $\lambda_{p,mem} = \lambda_{p,col} = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$

Джерело: розроблено авторами

Отримані дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисту для сталевих колон із різними системами вогнезахисту (рис. 3) дають змогу стверджувати таке:

- у разі застосування для сталевих колон систем вогнезахисту з вогнезахисним екраном, як впливає з отриманих результатів (табл. 2–5, 7, рис. 4–5), закономірним є підвищення тривалості досягнення критичної температури сталі й зменшення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту порівняно із системами без екрана. Це зумовлено зниженням швидкості підвищення температури сталі через наявність теплового опору повітряного проміжку між екраном і колоною;

- ефективність систем вогнезахисту з вогнезахисним екраном порівняно із системами без нього найбільша для малих значень коефіцієнта поперечного перерізу  $(A_m/V)_{min}$  і проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr,min}$  (табл. 5, 6, рис. 5, 6). За цими параметрами величина необхідної мінімальної товщини вогнезахисту є найбільш зменшеною порівняно із системами без екрана. Це зумовлено збільшенням рівня теплового опору повітряного проміжку між екраном і колоною порівняно із варіантами, в яких застосовано більші значення цих параметрів;

- ефективність системи вогнезахисту, яка складається із вогнезахисного покриття на поверхні колони і вогнезахисного екрана із вогнезахисним покриттям на його зовнішній поверхні, залежить від значень коефіцієнтів теплопровідності  $\lambda_{p,mem}$  і  $\lambda_{p,col}$ , коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$ , критичної температури  $\theta_{cr}$  та проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr}$ . Застосування вогнезахисного матеріалу з коефіцієнтом теплопровідності 2,0 Вт/(м·°С) на поверхні колони і екрана дає змогу зменшити значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисту порівняно із системами, для яких вогнезахисного покриття немає на поверхні колони або на поверхні екрана. Це

спричинено збільшенням рівня теплового опору повітряного проміжку між екраном і колоною порівняно з іншими системами.

Зазначені висновки можуть вважатися за доцільні з практичного погляду, тому що дають можливість обґрунтовано підходити до визначення параметрів складових систем вогнезахисту сталевих колон. З теоретичного погляду, вони дають змогу стверджувати про визначеність впливу теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на тепловий стан сталевих колон за стандартного температурного режиму, що є певними перевагами проведеного дослідження. Однак варто зауважити, що результати дослідження отримані для систем вогнезахисту, для яких передбачаються вогнезахисні матеріали, що мають сталі, незалежні від температури значення коефіцієнта теплопровідності, а також певну величину питомої теплоємності  $c_p = 1000$  Дж/(кг·°С) і густини  $\rho_p = 500$  кг/м<sup>3</sup>. Насправді, значення коефіцієнта теплопровідності пасивних і реактивних вогнезахисних матеріалів залежать від низки параметрів, зокрема від температури, а їх густина змінюється в широкому діапазоні [8]. Крім того, результати дослідження отримані для умови, що площі поверхні колони, вогнезахисного покриття і вогнезахисного екрана є однаковими. Фактично площа обігрівної поверхні вогнезахисного покриття, зокрема на екрані, може бути значно більшою за площу поверхні колони. Зазначене може призвести до наявності відмінностей в отриманих результатах.

Така невизначеність накладає певні обмеження на використання отриманих результатів, що може трактуватися, як недоліки цього дослідження. Неможливість зняти зазначені обмеження в рамках цього дослідження зумовлює потенційно цікавий напрям подальших наукових розвідок. Вони, зокрема, можуть бути орієнтовані на виявлення залежностей необхідної мінімальної товщини систем вогнезахисту, в яких застосовуються вогнезахисні матеріали зі змінним коефіцієнтом

теплопровідності і різною густиною, від коефіцієнта поперечного перерізу, проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих колон і критичної температури сталі, що враховують змінність площі поверхні різних компонентів цих систем. Це дасть можливість визначити оптимальні параметри систем вогнезахисту для сталевих колон, прийнятні для забезпечення їхньої вогнестійкості в широкому діапазоні тривалості вогневого впливу за стандартного температурного режиму.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** З огляду на проведені дослідження визначено дані щодо необхідної мінімальної товщини вогнезахисту  $d_{p,min}$  для сталевих колон із різними системами вогнезахисту. Встановлено, що значення цієї товщини як для систем із вогнезахисним екраном, так і без нього, суттєво залежить від коефіцієнта теплопровідності застосованих вогнезахисних матеріалів  $\lambda_p$ , коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$ , критичної температури сталі  $\theta_{cr}$  і проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr}$ . З підвищенням  $\lambda_p$ ,  $A_m/V$ ,  $t_{fr}$  і зменшенням  $\theta_{cr}$  товщина  $d_{p,min}$  збільшується.

Встановлено, що у разі застосування для сталевих колон систем вогнезахисту з вогнезахисним екраном закономірним є зменшення товщини вогнезахисту  $d_{p,min}$  порівняно із системами без екрана. Абсолютна різниця  $\Delta_{d,AB}$  і відносна різниця  $\delta_{d,AB}$  між значенням товщини покриття, отриманим для системи без вогнезахисного екрана, і значенням товщини покриття, отриманим для системи з вогнезахисним екраном без вогнезахисного покриття на його поверхні, змінюються в діапазонах від 0,06 мм до 15,5 мм і від 0,35% до 51,6% відповідно. Ці різниці мають найбільші значення для  $\lambda_{p,max} = 2,0$  Вт/(м·°C) і

$t_{fr,min} = 30$  хв, найменші – для  $t_{fr,max} = 240$  хв. Значення різниці  $\Delta_{d,AB}$  суттєво залежить від  $\lambda_p$  і  $t_{fr}$ , а її залежність від  $A_m/V$  і  $\theta_{cr}$  є малою. З підвищенням  $\lambda_p$  різниця  $\Delta_{d,AB}$  монотонно збільшується, а з підвищенням  $t_{fr}$  вона зменшується. Величина відносної різниці  $\delta_{d,AB}$ , крім  $\lambda_p$  і  $t_{fr}$ , також залежить від  $A_m/V$  і  $\theta_{cr}$ . Вона збільшується з підвищенням  $\lambda_p$ ,  $\theta_{cr}$  і зменшується з підвищенням  $A_m/V$  і  $t_{fr}$ .

Встановлено, що для систем вогнезахисту з екраном і вогнезахисним покриттям на його поверхні та/або на поверхні колони величина необхідної мінімальної товщини вогнезахисту є найбільш зменшеною порівняно із системами без екрана для малих значень коефіцієнта поперечного перерізу  $(A_m/V)_{min}$  і проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr,min}$ . Ефективність системи вогнезахисту (рівень зменшення товщини вогнезахисту порівняно із системою без екрана), яка складається із вогнезахисного покриття на поверхні колони і вогнезахисного екрана із вогнезахисним покриттям на його зовнішній поверхні, суттєво залежить від значень коефіцієнтів теплопровідності покриття екрана і колони ( $\lambda_{p,met}$ ,  $\lambda_{p,col}$ ), коефіцієнта поперечного перерізу  $A_m/V$ , критичної температури  $\theta_{cr}$  і проміжку часу збереженості вогнестійкості  $t_{fr}$ .

Визначено напрями подальших досліджень, котрі орієнтовані на виявлення залежностей необхідної мінімальної товщини систем вогнезахисту, в яких застосовуються вогнезахисні матеріали зі змінним коефіцієнтом теплопровідності і різною густиною, від коефіцієнта поперечного перерізу, проміжку часу збереженості вогнестійкості сталевих колон і критичної температури сталі, що враховують змінність площі поверхні різних компонентів цих систем.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EN 13501-2:2016 Fire classification of construction products and building elements. Part 2 : Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. Cen-Cenelec Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 CEN. 79 p.
2. EN 1993-1-2:2005 Eurocode 3 : Design of steel structures. Part 1–2 : General rules – Structural fire design. European Committee for Standardization. Central Secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p.

3. EN 13381-4:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 4 : Applied passive protection to steel members. European Committee For Standardization. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 83 p.
4. EN 13381-8:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 8: Applied reactive protection to steel members. European Committee for Standardization. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 80 p.
5. EN 13381-2:2014 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 2 : Vertical protective membranes. European Committee for Standardization. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 35 p.
6. Novak S., Drizhd V., Dobrostan O. Thermal state of steel structures with a combined fire protection system under conditions of fire exposure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3/10 (105). P. 17–25.
7. Новак С., Дридж В., Добростан О. Вплив параметрів системи вогнезахисту на вогнестійкість сталевих конструкцій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. № 1(11). С. 64–74.
8. Chao Zhang, Adam Pintar, Jonathan M. Weigand, Joseph A. Main, Fahim Sadek. Impact of variability in thermal properties of SFRM on steel temperatures in fire. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 123. P. 103361. Doi : 10.1016/j.firesaf.2021.103361.
9. Qian-Yi Song, Lin-Hai Han 1, Kan Zhou1 and Yuan Feng. Temperature distribution of CFST columns protected by intumescent fire coating. *Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS'2018)*; 5–7 December 2018, Hong Kong, China. 2018. P. 1437–1448. Doi : 10.18057/icass2018. p. 164.
10. Silva D, Bilotta A., Nigro E. Effect of the thermal input on the behavior of intumescent coatings. *Applications of Structural Fire Engineering (ASFE 2017)*; 7–8 September 2017, Manchester, UK. P. 351–360.
11. Silva D., A. Bilotta A., Nigro E. Analisi del comportamento di vernici intumescenti per la protezione al fuoco delle strutture in acciaio. Accettato per la pubblicazione negli atti della conferenza : *XXVI Giornate Italiane Della Costruzione In Acciaio* ; 28–30 Settembre 2017.
12. Bilotta A., Silva D., Nigro E. Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 121. P. 410–422.
13. Bilotta A., Silva D., Nigro E. General approach for the assessment of the fire vulnerability of existing steel and composite steel concrete structures. *Journal of Building Engineering*. 2016. Vol. 8. P. 198–207.
14. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2 : Design of concrete structures. Part 1–2 : General rules – Structural fire design. *European committee for standardization*. Central secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 97 p.
15. Bebawy Mena. Effective fire protection measures for field deployment of FRP strengthened concrete beams (2012). *Electronic Theses and Dissertations*. 2012. 401 P. URL : <http://scholar.uwindsor.ca/etd> (last accessed : 05.05.2022).
16. EN 1991-1-2:2002/AC:2013 Eurocode 1 : Actions on structures. Part 1–2 : General actions – Actions on structures exposed to fire. *European Committee for Standardization*. Central secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 61 p.
17. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016 Проєктування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2016. 111 с.
18. Круковский П. Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход) : монографія. Київ : Інститут технічної теплофізики НАН України, 1996. 218 с.

## REFERENCES

1. EN 13501-2:2016. Fire classification of construction products and building elements – Part 2 : Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services. Cen-Cenelec Management Centre : Rue de la Science 23, B-1040 Brussels. 2016 CEN. 79 p. [in English].
2. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3 : Design of steel structures . Part 1–2 : General rules – Structural fire design. *European Committee for Standardization*. Central Secretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2005 CEN. 78 p. [in English].
3. EN 13381-4:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 4 : Applied passive protection to steel members. *European Committee for Standardization*. Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 83 p. [in English].
4. EN 13381-8:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 8 : Applied reactive protection to steel members. *European Committee for Standardization*. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 80 p. [in English].
5. EN 13381-2:2014 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 2 : Vertical protective membranes. *European Committee for Standardization*. Management Centre : Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels. 2013 CEN. 35 p. [in English].
6. Novak, S., Drizhd, V., Dobrostan, O. (2020). Thermal state of steel structures with a combined fire protection system under conditions of fire exposure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3/10 (105). P. 17–25. [in English].
7. Novak, S. V., Drizhd, V. L., Dobrostan, O. V. (2021). Vplyv parametriv systemy vognexaxystu na vognestijkist stalevyh konstrukcij. [Influence of fire protection system parameters on fire resistance of steel structures]. *Naukovyi visnyk : Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*. 2021. № 1(11). S. 64–74. [In Ukrainian].
8. Chao, Zhang, Adam, Pintar, Jonathan, M. Weigand, Joseph, A. Main, Fahim, Sadek.(2021). Impact of variability in thermal properties of SFRM on steel temperatures in fire. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 123. P. 103361. Doi : <https://doi:10.1016/j.firesaf.2021.103361>. [in English].
9. Qian-Yi Song, Lin-Hai Han 1, Kan Zhou1 and Yuan Feng. (2018). Temperature distribution of CFST columns protected by intumescent fire coating. *Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS'2018)* 5–7 December 2018 – Hong Kong, China. 2018. P. 1437–1448. Doi : <https://doi:10.18057/icass2018>. p.164. [in English].
10. Silva, D., Bilotta, A., Nigro, E. (2017). Effect of the thermal input on the behavior of intumescent coatings. *ASFE 2017 – Applications of Structural Fire Engineering*, 7–8 September 2017, Manchester, UK. p. 351–360. [in English].
11. Silva, D., A. Bilotta, A., Nigro, E. (2017). Analisi del comportamento di vernici intumescenti per la protezione al fuoco delle strutture in acciaio. Accettato per la pubblicazione negli atti della conferenza : *XXVI Giornate Italiane della costruzione in acciaio* 28–30 Settembre 2017. [in English].
12. Bilotta, A., Silva, D., Nigro, E. (2016). Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 121. p. 410–422. [in English].

13. Bilotta, A., Silva, D., Nigro, E. (2016). General approach for the assessment of the fire vulnerability of existing steel and composite steel concrete structures. *Journal of Building Engineering*. 2016. Vol. 8. p. 198–207. [in English].
14. EN 1992-1-2:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2 : General rules – Structural fire design. European Committee for Standardization. Central ecretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 97 p. [in English].
15. Bebawy Mena. (2012). Effective fire protection measures for field deployment of FRP strengthened concrete beams (2012). *Electronic Theses and Dissertations*. 2012. 401 P. <http://scholar.uwindsor.ca/etd>. [in English].
16. EN 1991-1-2:2002/AC:2013. Eurocode 1 : Actions on structures. Part 1–2 : General actions – Actions on structures exposed to fire. European Committee for Standardization. Central ecretariat : rue de Stassart, 36, B-1050 Brussels. 2004 CEN. 61 p. [in English].
17. DSTU-N B V.2.6-211:2016. Proektuvannia stalevykh konstruksii. Rozrakhunok konstruksii na vohnestiikist [Design of steel structures. Calculation of structures for fire resistance]. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2016. 111 s. [in Ukrainian].
18. Krukovskiy P.G. Obratnyye zadachi teplomassoperenosa (obshchiy inzhenernyy podkhod) [Inverse problems of heat and mass transfer (general engineering approach)] : monohrafiia. Kyiv : Instytut tekhnichnoi teplofizyky NAN Ukrainy. 1996. 218 s. [in Russian].

## INFLUENCE OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF FIRE-RETARDANT MATERIALS ON THE THERMAL STATE OF STEEL COLUMNS UNDER STANDARD TEMPERATURE REGIME

S. Novak<sup>1</sup>, V. Drizhd<sup>2</sup>, O. Dobrostan<sup>1</sup>, M. Novak

<sup>1</sup>*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*

<sup>2</sup>*L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry, Ukraine*

---

### KEYWORDS: ANNOTATION

fire-retardant material; thermal conductivity; critical temperature of steel; minimal required thickness, steel column, standard fire scenario, thermophysical properties

Given the need to optimize the parameters of fire-retardant systems for building structures for further improvement and development of their technology, a study aimed at determining the impact of thermophysical properties of fire-retardant materials, which are components of such systems, on thermal state of steel columns at standard fire scenario is required. The objective of current study was to determine the relationships between the required minimal thickness of fire-retardant systems, thermophysical properties of fire-retardant materials that are part of such systems, critical steel temperature, cross-sectional factor and time of fire resistance for steel columns. To achieve this goal, the required minimal thicknesses of fire-retardant coatings for the studied fire-retardant systems were determined, the calculated data were summarized and the dependences of this thickness on the thermophysical properties of fire-retardant materials and other parameters of the systems were identified. It was established that the thickness value, both for systems with and without fire screen, significantly depends on thermal conductivity  $\lambda_p$  of applied fire-retardant materials, cross-sectional factor  $A_m/V$ , critical temperature  $\theta_{cr}$  and fire resistance time limit  $t_{fr}$ . With the increase in  $\lambda_p$ ,  $A_m/V$ ,  $t_{fr}$  and decrease in  $\theta_{cr}$  the required value of thickness  $d_{p,min}$  rises. It was shown that when fire-retardant systems with a screen are used for steel columns, there is a reduction in the required thickness of fire protection  $d_{p,min}$  compared to the system without a screen. The absolute difference  $\Delta_{d,AB}$  and the relative difference  $\delta_{d,AB}$  between the value of the fire-retardant system thickness obtained for a system without fire screen and the value obtained for a system with a screen without a fire-retardant coating on its surface, varies in the range from 0.06 mm to 15.5 mm and from 0.35% to 51.6%, respectively. For fire-retardant systems with screen and fire-retardant coating on its surface and (or) on the surface of the column, the required minimum thickness of the system for small values of cross-sectional factor  $(A_m/V)_{min}$  and short fire resistance time intervals  $t_{fr,min}$  is lesser, compared to those without screen. Data was obtained regarding the difference between the values of the required minimal thickness of fire protection for systems with fire-retardant coating on the outer surface of the screen and without it.