

УДК 614.841.332

*А. І. Ковальов<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., старший науковий співробітник (ORCID 0000-0002-6525-7558)**Ю. А. Отроїш<sup>2</sup>, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-0698-2888)**В. І. Томенко<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-7139-9141)*<sup>1</sup>*Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, Черкаси, Україна*<sup>2</sup>*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ВУГЛЕВОДНЕВОЇ ПОЖЕЖІ

Представлено результати експериментального визначення температури з не обігрівної поверхні сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі. Проведено аналіз результатів експериментального визначення температури з не обігрівної поверхні сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі (температура в печі, температура у визначених місцях на поверхні сталевих пластин, поведінка досліджуваного вогнезахисного покриття). На основі отриманих даних (температури в печі та з не обігрівної поверхні сталевих пластин з системою вогнезахисту) розв'язанням обернених задач теплопровідності знайдено теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття (коефіцієнт теплопровідності та питому об'ємну теплоємність), які в подальшому використовувалися для моделювання нестационарного прогріву сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі. Побудовано розрахункову скінчено-елементну модель системи «сталева пластина-вогнезахисне покриття» для моделювання нестационарного прогріву такої системи в програмному комплексі ANSYS R17.1. Проведено моделювання нестационарного прогріву системи «сталева пластина-вогнезахисне покриття» в програмному комплексі ANSYS R17.1. з заданими параметрами (геометрична модель, теплові впливи, початкові та граничні умови, властивості матеріалів системи). Проведено оцінку достовірності результатів чисельного моделювання в програмному комплексі ANSYS R17.1. реальним експериментальним випробуванням, зроблено висновок про адекватність розробленої моделі реальним процесам, що відбуваються при нагріванні сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі.

**Ключові слова:** моделювання, вогнезахисне покриття, температурний режим вуглеводневої пожежі, теплофізичні характеристики, критична температура сталі

### 1. Вступ

Дослідження вогнестійкості сталевих конструкцій і вогнезахисної здатності покриттів таких конструкцій експериментальними методами становить серйозну проблему, що полягає в трудомісткості проведення експериментів, складності отримання повного спектру інформації, яка відображає поведінку всіх елементів конструкції під впливом пожежного навантаження. Таким чином з'являється необхідність у використанні методик чисельного моделювання, що дозволяють отримувати необхідні параметри максимально точно і достовірно для всіх елементів конструкції, що випробовується.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Питанням розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій присвячено велика кількість робіт [1–5]. В [1] наведені експериментальні та розрахункові дані щодо визначення температури сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі. В [2] представлені результати експериментального дослідження впливу захисного покриття на вогнезахисні властивості покриттів, що спучуються, шляхом порівняння температур в вогнезахисних сталевих елементах і ефективної теплопровідності при їх випробуваннях в умовах стандартного температурного режиму пожежі. Робота [3] описує результати експериментальних випробувань сталевих пластин.

тин різних розмірів з водоемульсійним вогнезахисним покриттям, що спрямовані на дослідження його теплових властивостей та співвідношення зміни температури та товщини в умовах випробувань сталевих пластин різної товщини в умовах кривої тліючої пожежі. В [4] описані способи підвищення меж вогнестійкості металевих будівельних конструкцій нафтогазового комплексу при вуглеводневому температурному режимі, а в [5] описаний комбінований вплив на сталеву колону вибуху, який викликає деформацію і в подальшому пожежу. В [6] досліджували вплив кліматичних факторів на вогнезахисну здатність покриттів сталевих конструкцій, а вплив температурних режимів на вогнезахисну здатність залишився не дослідженим. Автори [7] моделювали вуглеводневі реактивні пожежі за допомогою CFD-аналізу, використовуючи рівняння Рейнольдса у поєднанні з моделлю турбулентності, а в [8] розглядали під час термічного аналізу з використанням моделювання вогню та тепла (FAHTS) та статичне навантаження з використанням граничної міцності. Проте в цих роботах поза увагою дослідників залишилися питання розробки скінчено-елементної моделі системи «сталева пластина-вогнезахисне покриття» для моделювання нестационарного прогріву такої системи в програмному комплексі ANSYS R17.1. У зв'язку з цим, невирішеною частиною проблеми є відсутність логічно-структурної схеми розрахунку нестационарного прогріву вогнезахисних сталевих конструкцій як з використанням даних експериментальних досліджень, так і комп'ютерного моделювання фізичних процесів, що відбуваються в таких конструкціях.

### 3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи було оцінювання вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі та розрахункового визначення нестационарного прогріву сталеві пластина з системою вогнезахисту у вигляді вогнезахисного покриття, що спучується, за допомогою програмного забезпечення ANSYS R17.1, та розрахунок часу досягнення критичної температури прогріву сталеві пластина (в даному дослідженні прийнято 500 °C) визначеної товщини при заданих умовах випробування.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

– провести вогневі випробування з експериментального визначення температури з необігрівної поверхні сталевих пластин з вогнезахисним покриттям за температурного режиму вуглеводневої пожежі;

– розв'язанням обернених задач теплопровідності за результатами експериментального визначення температур визначити теплофізичні характеристики досліджуваного вогнезахисного покриття;

– побудувати адекватну фізичну та комп'ютерну моделі в програмному середовищі ANSYS R17.1, яка б точно і достовірно відтворювала процеси, що відбуваються в системі «сталева пластина-вогнезахисне покриття» при її нагріванні в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі, в яку входять: геометрія об'єкту, що досліджується, відповідні теплові впливи, початкові умови, граничні умови з обігрівної та необігрівної поверхні (в нашому випадку ГУ III-го роду), навантаження, які прикладаються до конструкції, якщо такі є, властивості матеріалів системи (теплопровідність покриття та сталі, теплоємність покриття та сталі, коефіцієнт температурного розширення для сталі і т.д.).

– порівняти результати експериментального визначення температури з необігрівної поверхні сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах впливу вуглеводневого температурного режиму пожежі з результатами моделювання в програмному середовищі ANSYS R17.1.

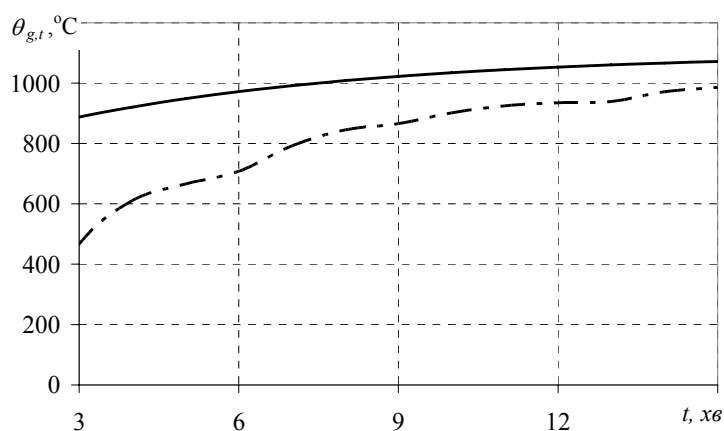
#### 4. Результати вогневих випробувань сталевих пластин з вогнезахисним покриттям

Для цього було сплановано та проведено експерименти по визначенню температури з необігрівної поверхні сталеві пластини з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі. Експерименти проводили із застосуванням металевих пластин зі сталі Ст. 3 розмірами 500 мм×500 мм×5 мм [9]. Вогнезахисну речовину наносили механізованим способом, середня товщина покриття складала 0,42 мм. Експерименти проводили при температурі повітря 20 °С, відносній вологості повітря 48 % та тискові 743 мм рт. ст.

Температурний режим вуглеводневої пожежі визначався за формулою [10]:

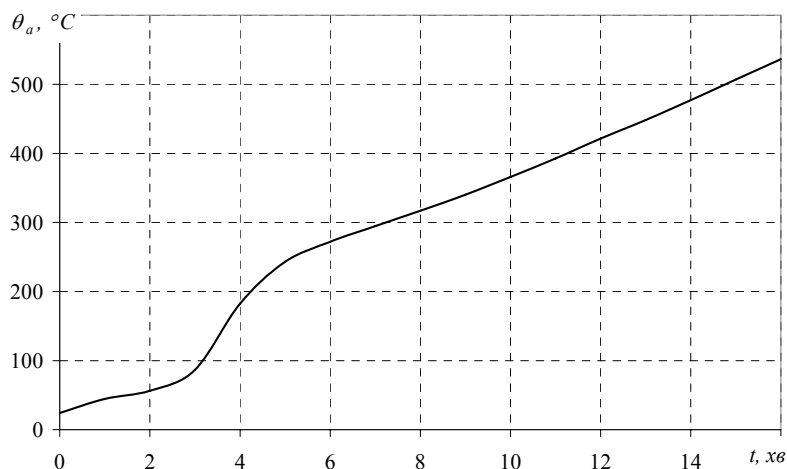
$$\Theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20, \quad (1)$$

де  $\Theta_g$  – температура газового середовища біля конструкції, °С;  $t$  – час, хв.



**Рис. 1.** Залежність температури в печі від тривалості вогневого впливу:  
 — крива температурного режиму вуглеводневої пожежі;  
 - - - температурна крива під час експерименту в печі.

Як видно із рис. 1, після 3 хв вогневого впливу температура в печі наближається до температури вуглеводневої пожежі і на 15 хв досягає 986 °С. Температура з необігрівної поверхні сталеві пластини при цьому за 16 хв досягла критичної температури сталі 536,4 °С (рис. 2).



**Рис. 2.** Залежність середньої температури з необігрівної поверхні сталеві пластини з вогнезахисним покриттям «Amotherm Steel Wb» від часу вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі

## 5. Дослідження теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття та обґрунтування математичної моделі

За експериментальними даними вимірювання температури сталевих пластин (рис. 2) та температури в печі (рис. 1) шляхом розв'язання ОЗТ визначали теплофізичні характеристики досліджуваного вогнезахисного покриття. При цьому застосовували таку математичну модель, яку побудовано для прийнятої фізичної моделі теплового стану в системі «вогнезахисне покриття – сталевая пластина» (рис. 3).

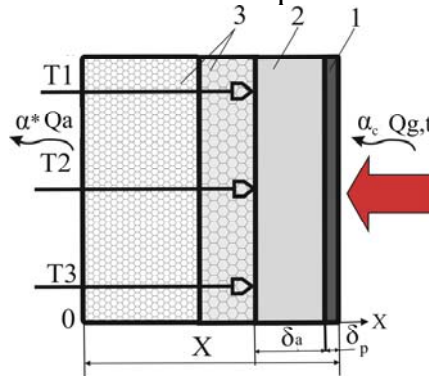


Рис. 3. Фізична модель теплового стану в системі «вогнезахисне покриття – сталевая пластина»: 1 – вогнезахисне покриття; 2 – сталевая пластина; 3 – 2 шари теплоізоляційного матеріалу

При розв'язанні теплотехнічної задачі визначали залежність температури сталі від часу вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі і використовували математичну модель процесу теплопровідності в одновимірній нелінійній постановці, яка містить такі рівняння [10]:

$$c_v(x, t) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(x, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (2)$$

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

– початкова умова:  $T(x, 0) = T_0,$  (3)

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

$$\lambda_c \frac{\partial T(x_2, t)}{\partial x} + \alpha^* (T_s(t) - T(x, t)) = 0, \quad (4)$$

де  $\alpha^* = \alpha_c + \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \sigma [(\theta_{g,t} + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] / (\theta_{g,t} - \theta_m),$  (5)

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

$$\lambda_p \frac{\partial Q_p}{\partial x} = C_a \cdot \rho \frac{V}{A_p} \cdot \frac{\partial Q_p}{\partial t}, \quad (6)$$

$$\theta_a(t) = \theta_p(0, t), \quad (7)$$

де  $x$  – координата в покритті ( $x = 0$  відповідає місцю контакту покриття зі сталеву поверхнею), м;  $t$  – час, с;  $t_{fi,requ}$  – час, який відповідає нормованій межі вогне-

стійкості,  $t_{fi,requ} = 15$  хв;  $\alpha_c$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією на обігрівній поверхні покриття,  $\alpha_c = 50$  Вт/(м·К);  $\alpha^*$  – сумарний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією та тепловою радіацією на обігрівній поверхні покриття;  $\Phi$  – кутовий коефіцієнт,  $\Phi = 1,0$ ;  $\varepsilon_m$  – коефіцієнт теплового випромінювання обігрівної поверхні покриття,  $\varepsilon_m = 0,8$ ;  $\varepsilon_f$  – коефіцієнт теплового випромінювання полум'я,  $\varepsilon_f = 1,0$ ;  $\sigma$  – стала Стефана Больцмана,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>);  $\theta_a$  – температура сталі, °С;  $\theta_{g,t}$  – температура газового середовища в момент часу  $t$ , яка змінюється за температурним режимом вуглеводневої пожежі (1), °С;  $\theta_m$  – температура обігрівної поверхні покриття, °С;  $\theta_0$  – початкова температура,  $\theta_0 = 20$  °С;  $\theta_p$  – температура покриття, °С;  $\lambda_p$  – теплопровідність покриття, Вт/(м·К);  $c_a$  – питома теплоємність сталі, Дж/(кг·К);  $c_p$  – питома теплоємність покриття, Дж/(кг·К);  $\rho_p$  – густина покриття,  $\rho_p = 1420$  кг/м<sup>3</sup> (дані виробника);  $\rho_a$  – густина сталі,  $\rho_a = 7850$  кг/м<sup>3</sup>;  $A_p / V$  – коефіцієнт перерізу захищеної сталеві балки, м<sup>-1</sup>.

Розрахунки температури сталі за даною математичною моделлю були виконані із застосуванням чисельного методу розв'язання за неявною кінцево-різницевою схемою апроксимації.

Теплофізичні властивості зазначеного покриття визначено за методом, який наведено в додатку Л [11] (методом розв'язання оберненої задачі теплопровідності). Залежність теплопровідності покриття від температури наведено на рис. 4, а значення його об'ємної теплоємності становить  $c_p \cdot \rho_p = 6 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup>·К.

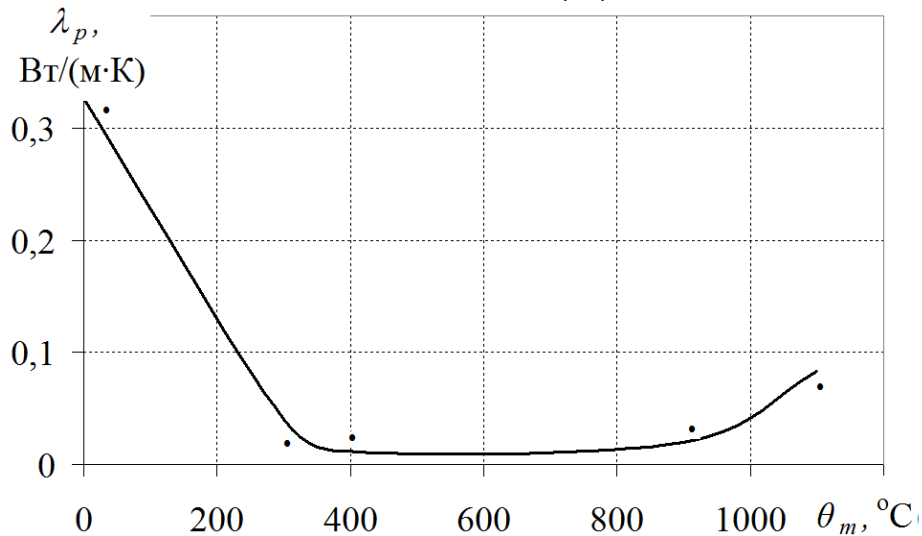


Рис. 4. Залежність ефективного коефіцієнту теплопровідності покриття «Amotherm Steel Wb» від температури, знайденого розв'язанням обернених задач теплопровідності

Питома теплоємність сталі  $c_a$  (Дж/(кг·К)) визначали за формулами [10]:  
– для  $20$  °С  $\leq \theta_a \leq 600$  °С:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3, \quad (8)$$

– для  $600$  °С  $\leq \theta_a \leq 735$  °С:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}, \quad (9)$$

– для  $735$  °С  $\leq \theta_a < 900$  °С:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}, \quad (10)$$

– для  $900 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$c_a = 650, \quad (11)$$

де  $\theta_a$  – температура сталі,  $^\circ\text{C}$ .

Теплопровідність сталі  $\lambda_a$  (Вт/(м·К)) визначали за формулами [10]:

– для  $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 800 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a, \quad (12)$$

– для  $800 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\lambda_a = 27,3, \quad (13)$$

де  $\theta_a$  – температура сталі,  $^\circ\text{C}$ .

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

## 6. Розробка моделі нестационарного прогріву системи «сталева пластина-вогнезахисне покриття»

Проведено розрахунки розподілу температури в перерізі сталевій пластині з вогнезахисним покриттям методом скінченних елементів при режимі вуглеводневої пожежі. Для цього було побудовано скінчено-елементну модель системи «сталева пластина-вогнезахисне покриття» в програмному комплексі ANSYS R17.1. (рис. 5).

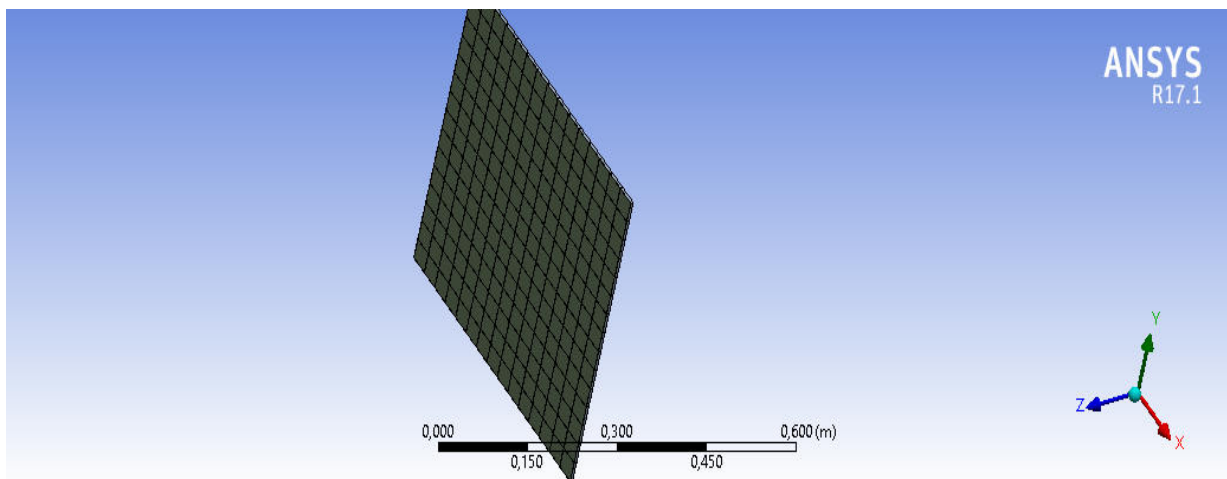


Рис. 5. Розрахункова скінчено-елементна модель системи «сталева пластина-вогнезахисне покриття»

Використовуючи розрахункову скінчено-елементну модель системи «сталева пластина-вогнезахисне покриття» було проведено розрахунки нестационарного прогріву такої системи в програмному комплексі ANSYS R17.1., результати якого зображено на рис. 6.

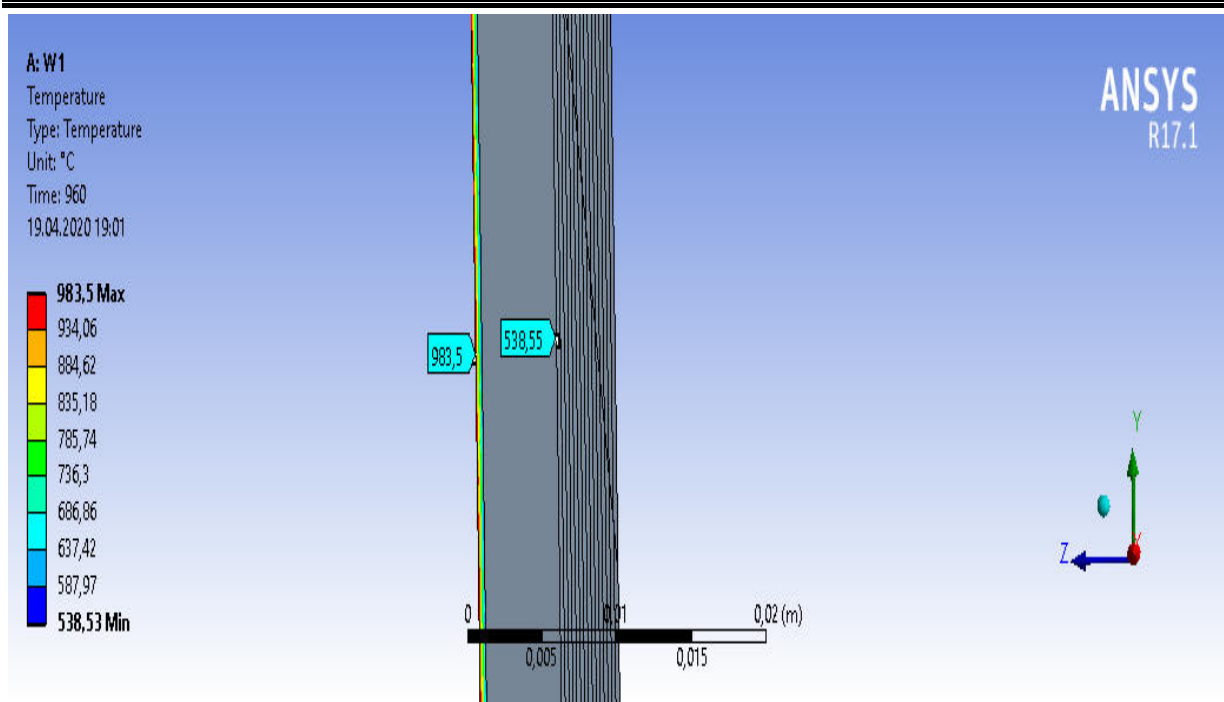


Рис. 6. Розподіл температури в моделі «сталевіа пластина-вогнезахисне покриття» після 16 хв. випробувань в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі (вид збоку)

## 7. Порівняння результатів вогневих випробувань з результатами моделювання

Отримані температури порівнювали з даними експериментального визначення температури сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі (рис. 7).

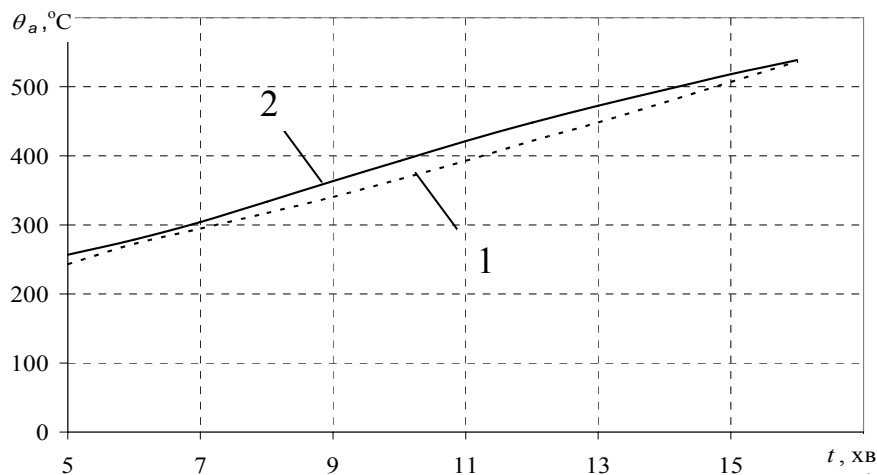


Рис. 7. Залежність середньої температури з необігрівної поверхні сталевіа пластини з вогнезахисним покриттям від часу вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі: 1 – отримана експериментальним шляхом; 2 – отримана за допомогою моделювання в ANSYS R17.1

Під час верифікації розрахунковіа моделі встановлено, що результати експериментальних досліджень і чисельного аналізу в програмі ANSYS R17.1 для перших 5 хвилин досить суттєво відрізняються у всіх контрольних точках, проте в подальшому ця відмінність стабілізується, і аж до закінчення експерименту не перевищує 10 %, а становить 6,76 %, що можна вважати прийнятним результатом.

## 8. Обговорення результатів

В результаті проведеного дослідження вдалося вирішити актуальну, на сьогодні, науково-практичну задачу підвищення вогнестійкості сталевих конструкцій шляхом застосування вогнезахисних покриттів, що спучуються, та дослідження впливу температурного режиму пожежі під час процедури визначення ефективності вогнезахисних покриттів вогнезахисних несучих сталевих конструкцій на значення меж вогнестійкості таких конструкцій. Запропонований підхід до визначення меж вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій, що ґрунтується на експериментальному визначенні нестационарного прогріву сталевих пластин (зразків зменшених розмірів) за умов випробувань при температурному режимі вуглеводневої пожежі. Обробку результатів вогневих випробувань в роботі запропоновано проводити застосовуючи розв'язання прямих та обернених задач теплопровідності. Також обґрунтовано перелік необхідних параметрів теплового стану елементів вогнезахисних вогнезахисними покриттями несучих сталевих конструкцій, зокрема, коефіцієнт теплопровідності, питома об'ємна теплоємність вогнезахисного покриття та умови випробувань, які потрібно забезпечувати під час процесу визначення ефективності зазначених покриттів. За допомогою розробленої комп'ютерної моделі в програмному середовищі ANSYS R17.1 вдалося відтворити процеси, що відбуваються в системі «сталева пластина-вогнезахисне покриття» при її нагріванні в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі. Результати порівняння експериментального визначення температури з необігрівної поверхні сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах впливу вуглеводневого температурного режиму пожежі з результатами моделювання в програмному середовищі ANSYS R17.1 вказують на те, що розроблена модель адекватно і точно (з похибкою до 10 %) описує процеси, що відбуваються в системі «сталева пластина-вогнезахисне покриття».

## 9. Висновки

1. Сплановані та проведені вогневі випробування з експериментального визначення температури з необігрівної поверхні сталевих пластин, товщиною 5 мм з вогнезахисним покриттям, що спучується середньою товщиною 0,42 мм в умовах впливу температурного режиму вуглеводневої пожежі.

2. За результатами проведених вогневих випробувань розв'язанням обернених задач теплопровідності визначили теплофізичні характеристики досліджуваного вогнезахисного покриття, а саме: коефіцієнт теплопровідності, що залежить від температури та питомої об'ємної теплоємності. При цьому встановлено, що в діапазоні температур від початкової температури до 400 °С значення коефіцієнту теплопровідності покриття «Amotherm Steel Wb» падає, що можна пояснити спученням покриття та збільшенням його пористості і проходить через мінімальне значення приблизно 0,01 Вт/м·К (при температурі від 400 °С до 1000 °С). Зростання коефіцієнту теплопровідності в діапазоні температур після 1000 °С пояснюється появою радіаційної складової в порах покриття в поєднанні з його високотемпературною усадкою і обвуглюванням.

3. Проведено верифікацію результатів чисельного моделювання реальним випробуванням, в результаті чого встановлено, що результати експериментальних досліджень і чисельного аналізу в програмі ANSYS R17.1 позитивно корелюють між собою в межах допустимої похибки, яка становить 6,76 %.

4. Зроблено висновок про адекватність розробленої моделі реальним проце-



сам, що відбуваються при нагріванні сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі. В той же час, подальші дослідження необхідно орієнтувати на розробку моделей для розрахунку сталевих конструкцій на вогнестійкість і розв'язання більш об'ємних задач числового моделювання вогневої дії пожежі на вогнезахиснені сталеві конструкції (колони, балки).

### Література

1. Novak S., Drizhd V., Dobrostan O., Maladyka L. Influence of testing samples' parameters on the results of evaluating the fire-protective capability of materials // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 2/10 (98). P. 35–42. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.164743.
2. Xu Q., Li G.-Q., Jiang J., Wang Y. C. Experimental study of the influence of topcoat on insulation performance of intumescent coatings for steel structures // *Fire Safety Journal*. 2018. V. 101. P. 25–38. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.08.006>.
3. De Silva D., Bilotta A., Nigro E. Experimental investigation on steel elements protected with intumescent coating // *Construction and Building Materials*. 2019. V. 205. P. 232–244. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.223>.
4. Gravit M., Gumerova E., Bardin A., Lukinov V. Increase of fire resistance limits of building structures of oil-and-gas complex under hydrocarbon fire // Springer, Cham: *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. 2018. V. 692. P. 818–829.
5. Paik J. K., Czujko J. Assessment of hydrocarbon explosion and fire risks in offshore installations: Recent advances and future trends // *IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering*. 2016. V. 4. P. 167–179.
6. Kovalov A., Otrosh Y., Vedula. S., Danilin O., Kovalevska T. (2019). Parameters of fire-retardant coatings of steel constructions under the influence of climatic factors. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. V. 3. P. 46–53. DOI: 10.29202/nvngu/2019-3/9 [in Ukrainian].
7. Luis G. Zárate, Hugo E. Laraa, Mario E. Corderoa. Infrared thermography and CFD analysis of hydrocarbon jet fires // *Chemical engineering transactions*. 2014. V. 39. P. 321–328.
8. Imran M., Liew M. S., Nasif M. S., Niazi U. M., Yasreen A. Hazard assessment studies on hydrocarbon fire and blast: An overview // *Advanced Science Letters*. 2017. V. 23. P. 1243–1247.
9. Ковалев А. И., Дашковский В. Ю. Исследование огнезащитной способности покрытия «Amotherm Steel Wb» для защиты металлических конструкций расчетно-экспериментальным методом // *Ежеквартальный журнал СНБОР «Безопасность и Пожарная Техника»*. ВіТР. 2014. V. 35. Issue 3. P. 107–113.
10. ДСТУ-Н Б В.2.6–211:2016 Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. [Чинний від 2017-04-01]. Мінрегіон України, 2016. 147 с.
11. ДСТУ Б В 1.1–17:2007 Захист від пожежі. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності. [Чинний від 2008–01–01]. 2009. 105 с.

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

*Y. Otrosh<sup>2</sup>, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*

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

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

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

## THE MODELLING OF THE THERMAL STATE OF THE STEEL CONSTRUCTIONS UNDER THE HYDROCARBON FIRE TEMPERATURE MODE

The results of the experimental determination of the temperature from a non-heating surface of the steel plates with a flame retardant under conditions of fire exposure under the hydrocarbon fire temperature mode are presented. The analysis of the results of the experimental determination of the temperature from a non-heating surface of the steel plates with a flame retardant under conditions of fire exposure under the hydrocarbon fire temperature mode is made (the oven temperature, the temperature of the designated places on the surface of the steel plates, the behaviour of the explored flame retardant). The thermophysical characteristics of the flame retardant, which are used for the model of the non-stationary heating of the steel plates with flame retardant under the conditions of fire influence under the hydrocarbon fire temperature mode are found on the basis of the results (the oven temperature and the temperature from a non-heating surface of the steel plates with the fire protection system) of the inverted tasks of the thermal conductivity. A calculated finite element model of the system "steel plate-flame retardant" was constructed to simulate the non-stationary heating of such a system in the ANSYS R17.1 software complex. The model of the non-stationary heating of the system "steel plate-flame retardant" in the ANSYS R17.1 with the results of the geometric model, the thermal impacts, the initial and a boundary conditions, the properties of materials of the system was made. The reliability of the numerical simulation results is estimated in the ANSYS R17.1 software complex by real test, the conclusion about adequacy of the developed model to the real processes occurring when heating the steel plates with flame retardant under the conditions of fire influence under the hydrocarbon fire temperature mode is made.

**Keywords:** modelling, flame retardant coating, temperature mode of the hydrocarbon fire, thermophysical characteristics, critical temperature of steel

### References

1. Novak, S. V. (2016). Obgruntuvannya parametriv zrazkiv dlia eksperymentalnoho vyznachennia temperatury stalevykh plastyn z vohnezakhysnym pokryttiam v umovakh vohnevoho vplyvu za standartnym temperaturnym rezhymom pozhezhii. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 2 (2), 18–23.
2. Nemchynov, Yu. I., Poklonskyi, V. H., Baitala, Kh. Z. ta [in.]. (2014). Doslidzhennia vohnestiikosti budivelnykh konstruktsii. *Nauka ta budivnytstvo*, 2, 11–16.
3. Poklonskyi, V. H., Fesenko, O. A., Baitala, Kh. Z. ta [in.]. (2016). Rozrakhunkovi metody otsinky vohnestiikosti budivelnykh konstruktsii za Yevrokodamy. *Budivelni konstruktsii*, 380–389.
4. Abramov, I. V., Gravit, M. V., Gumerova, E. I. (2018). Povyshenie predelov ognestoykosti sudovykh i stroitelnykh konstruktsiy pri uglevodorodnom temperaturnom rezhime. *Gazovaya promyshlennost*, 5, 108–117.
5. Paik, J. K., Czujko, J. (2016). Assessment of hydrocarbon explosion and fire risks in offshore installations: Recent advances and future trends. *IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering*, 4, 167–179.
6. Kovalov, A., Otrosh, Y., Vedula, S., Danilin, O., Kovalevska, T. (2019). Parameters of fire-retardant coatings of steel constructions under the influence of climatic factors. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 46–53. DOI: 10.29202/nvngu/2019-3/9 [in Ukrainian].
7. Kovalov, A. I., Kachkar, Ye. V., Zobenko, N. V. [ta in.]. (2014).

Eksperymentalne doslidzhennia vohnezakhysnoi zdatnosti pokryttia «Amotherm Steel Wb» pry temperaturnomu rezhymovi vuhlevodnevoi pozhezhi. Pozhezha bezpeka: teoriia i praktyka, 17, 53–60.

8. Boeva, A. A., Prorok, V. Ya., Trofimets V. Ya. (2017). Issledovanie ekspluatatsionnykh kharakteristik modifitsirovannykh vspuchivayushchikhsya ogneshchitnykh sostavov v usloviyakh goreniya uglevodorodov. Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere, 2, 96–102.

9. DSTU-N-P B V.1.1–29:2010. (2011). Zakhyst vid pozhezhi. Vohnezakhysne obrobliannia budivelnnykh konstruksii. Zahalni vymohy ta metody kontroliuvannia. [Chynnyi vid 2011–11–01]. Minrehionbud Ukrainy, 9.

10. DSTU-N B V.2.6–211:2016. (2016). Proektuvannia stalevykh konstruksii. Rozrakhunok konstruksii na vohnestiikist. [Chynnyi vid 2017-04-01]. Minrehion Ukrainy, 147.

11. DSTU B V 1.1–17:2007. (2009). Zakhyst vid pozhezhi. Vohnezakhysni pokryttia dlia budivelnnykh nesuchykh metalevykh konstruksii. Metod vyznachennia vohnezakhysnoi zdatnosti. [Chynnyi vid 2008–01–01], 105.

Надійшла до редколегії: 06.02.2020

Прийнята до друку: 17.02.2020