



НАУКОВИЙ ВІСНИК: Цивільний захист та пожежна безпека № 2 (12), 2021

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2518-1777

Редакційна колегія:

головний редактор –
голова редколегії
д-р техн. наук

Поздєєв С. В.

канд. техн. наук
науковий редактор –

Коваленко В. В.

відповідальний секретар
канд. техн. наук

Огурицов С. Ю.

д-р техн. наук
д-р техн. наук
д-р техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. хім. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
PhDEng.
PhDEng.

Тютюник В. В.
Цапко Ю. В.
Ніжник В. В.
Лавренюк О. І.
Лоїк В. Б.
Кропивницький В. С.
Новак С. В.
Пазен О. Ю.
Паснак І. В.
Сізіков О. О.
Ліхнєвський Р. В.
Іванов Ю. С.
Навроцький О. Д.
Врублевський Д.
Самберг А.

Літературні редактори: **Помазанова Т. І.**
Івашина Н. О.
(англ. мова)

Випускові редактори: **Борисова А. С.**
Литвиновський Є. Ю.

Адреса редакції:

03074, м. Київ, вул. Вишгородська, 21

Телефони:

(+380) (44) 430-02-85

<https://nvcz.undicz.org.ua>

e-mail: niv1966@ukr.net

Заснований у 2016 році
Виходить 2 рази на рік

Засновник
Інститут державного управління та наукових
досліджень з цивільного захисту (ІДУ НД ЦЗ)

Видавець
Інститут державного управління та наукових
досліджень з цивільного захисту (ІДУ НД ЦЗ)

Журнал зареєстровано Міністерством
юстиції України
Свідоцтво від 20.07.2020
серія КВ № 24507-14447 ПР

Журнал включено до категорії «Б» Переліку
наукових фахових видань України в галузі
технічних наук за спеціальностями:
261 «Пожежна безпека»,
263 «Цивільна безпека»
Наказ Міністерства освіти і науки України
від 02.07.2020 № 886
У разі передрукування матеріалів письмовий
дозвіл ІДУ НД ЦЗ є обов'язковим
Рекомендовано до видання рішенням
Вченої ради ІДУ НД ЦЗ
Протокол від 22. 12.2021 № 7

Ідентифікатор випуску DOI:
<https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2>

Підписано до друку 23.12.2021

Формат 60 × 84/8
Наклад 50 прим.

ЗМІСТ

CONTENT

**В. Михайлов, В. Коваленко,
О. Корнієнко, В. Свірський,
М. Копильний, А. Онищук**

Дослідження строку придатності вогнезахисного покриву (просочення) вогнезахисних засобів для деревини

4

**V. Mykhailov, V. Kovalenko, O. Kornienko,
V. Svirskyi,
M. Kopylnyi, A. Onyshchuk**

Study of the expiration date of fire-protective coating (impregnation) of fire-protective agents for wood

**А. Циганков, В. Ніжник,
Я. Балло, О. Сізіков,
О. Жихарєв, О. Тесленко**

Вплив часу прибуття підрозділів пожежної охорони до місця виклику на тривалість гасіння пожежі на території зони відчуження

11

**A. Tsyhankov, V. Nizhnyk,
Ya. Ballo, O. Sizikov,
O. Zhikharev, O. Teslenko**

Influence of the time of arrival of fire protection subjects to the place of call on the duration of fire extinguishing on the territory of the alienation zone

**О. Нуянзін, Т. Самченко,
В. Нуянзін, А. Майборода**

Наукове обґрунтування методу розрахункової оцінки класу вогнестійкості будівельних конструкцій кабельних тунелів

20

**O. Nuianzin, T. Samchenko,
V. Nuianzin, A. Maiboroda**

Scientific substantiation of the method of calculation assessment of the class of fire resistance of building structures of cable tunnels

**Я. Балло, С. Голікова,
О. Сізіков, О. Жихарєв,
О. Савченко, Л. Несенюк**

Вимоги пожежної безпеки до висотних громадських будівель з умовною висотою від 100 м до 150 м

30

**Ya. Ballo, S. Golikova,
O. Sizikov, O. Zhikharev,
O. Savchenko, L. Nesenyuk**

Fire safety requirements for high-rise public buildings with a conditional height of 100 m to 150 m

С. Новак, В. Дріжд, О. Добростан

Оцінювання вогнезахисних властивостей покриттів і облицювань для сталевих конструкцій

43

S. Novak, V. Drizhd, O. Dobrostan

Evaluation of fire protective properties of coatings and facings for steel structures

**С. Мосов, В. Хижняк,
А. Литовченко, Д. Ядченко**

Класифікація, функції та завдання безпілотної авіації у сфері цивільного захисту України

54

**S. Mosov, V. Khyzhnyak,
A. Lytovchenko, D. Yadchenko**

Classification, functions and tasks of unmanned aviation in the field of civil protection of Ukraine

С. Новак, М. Новак, В. Дріжд

Оцінювання теплофізичних властивостей реактивних вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій

69

S. Novak, M. Novak, V. Drizhd

Evaluation of thermal properties of reactive fire protective coatings for steel structures

УДК 614.841.34

НАУКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ КЛАСУ ВОГНЕСТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ КАБЕЛЬНИХ ТУНЕЛІВ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2.20-29>

Нуянзін О. М.^{1*}, ORCID iD 0000-0003-2527-6073
Самченко Т. В.², ORCID iD 0000-0003-3702-8296
Нуянзін В. М.¹, ORCID iD 0000-0003-4785-0814
Майборода А. О.¹, ORCID iD 0000-0001-6108-9772
*E-mail : alexandrnuyanzin@gmail.com

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

²Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 29.09.2021

Пройшла рецензування: 04.11.2021

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

кабельний тунель, температурний режим пожежі, комп'ютерне моделювання, будівельні конструкції, клас вогнестійкості.

АНОТАЦІЯ

У цій роботі розраховано температурні режими прогрівання залізобетонних огорожувальних конструкцій різної товщини кабельного тунелю за постійних значень питомої енергії згоряння пожежного навантаження, площі поперечного перерізу кабельного тунелю та горизонтальної складової швидкості руху повітря. За результатами наукової розвідки обґрунтовано та перевірено алгоритм розрахунку, а також розроблено на його основі метод розрахункової оцінки класу вогнестійкості будівельних конструкцій кабельних тунелів, що базується на математичному моделюванні. У разі обчислення будуються розподіли температури по перерізу огороження кабельного тунелю у час, який відповідає необхідному класові вогнестійкості, та визначається відповідність заданій межі вогнестійкості.

Постановка проблеми. Ще з 70-х років минулого століття загострилася проблема пожежної безпеки електричних кабелів та кабельних споруд через зростання кількості пожеж на атомних станціях (АЕС), теплових електростанціях та інших енергетичних об'єктах.

Аналіз меж вогнестійкості будівельних конструкцій тунелів та забезпечення їх відповідності чинним нормативам є актуальним завданням, оскільки кабельні тунелі відрізняються пожежним навантаженням, видом кабелів, що прокладені у них, геометричною конфігурацією, аеродинамічними характеристиками. Отже, температурні режими пожежі у тунелях можуть відрізнятися і від стандартного, і між собою. У такому разі неможливо гарантувати зазначену відповідність. Сьогодні існує можливість здійснити

дослідження з вивчення цього питання на основі результатів обчислювальних експериментів, для того щоб не проводити коштовні та трудомісні випробування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Пожежу умовно поділяють на три стадії: загоряння, розвинене горіння й загасання [1]. Розроблено та відображено у нормативних документах два методи переходу від реальних режимів пожежі до визначеного в нормативах «стандартного» режиму пожежі [2–4].

Для більш точного моделювання пожежі, доцільно застосувати більш складні фізичні моделі, що реалізуються у непростих комп'ютерних програмах [5–7]. В алгоритми цих програм закладені сучасні обчислювальні методи.

У статті [5] та дисертаційній роботі [6] було викладено результати повного факторного експерименту, внаслідок якого

отримано залежності максимальної температури усередині кабельного тунелю під час пожежі ($Q_{e\max}$), тривалості пожежі в певній локальній зоні тунелю (τ_1) та часу

досягнення максимальної температури всередині під час пожежі (τ_{\max}), що представлено виразами (1), (2), (3):

$$Q_{e\max} = 870.59 + 0.1 \cdot x_1 - 27.92 \cdot x_2 - 11.39 \cdot x_3 + 0.01 \cdot x_1 \cdot x_2 - 5.28 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (1)$$

$$\tau_1 = 48.969 + 0.002 \cdot x_1 - 1.44 \cdot x_2 + 0.0125 \cdot x_3 + 0.001 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.016 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (2)$$

$$\tau_{\max} = 6.55 + 0.001 \cdot x_1 + 0.596 \cdot x_2 + 0.0563 \cdot x_3 + 0.025 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (3)$$

де x_1 – фактор 1 (пожежне навантаження у перерахунку на 1 м² кабельного тунелю, МДж/м²);
 x_2 – фактор 2 (площа поперечного перерізу кабельного тунелю, м²);
 x_3 – фактор 3 (горизонтальна складова швидкості руху повітря, м/с).

Доцільно спрямувати подальшу роботу на дослідження вогнестійкості будівельних конструкцій кабельних тунелів за визначених за рівняннями температурних режимів пожежі у тунелі та розробити відповідну методику [5–6].

Методи дослідження. Комп'ютерне моделювання та теоретичні дослідження, проведені на основі системи диференціальних рівнянь Нав'є – Стокса для середовищ, рівнянь теплопровідності Фур'є, а також рівнянь теплообміну у твердих, газоподібних тілах та напружено-деформованого стану твердих будівельних матеріалів в умовах нагрівання під час пожежі. Для їх розв'язання було використано метод граничних (кінцевих) елементів, а також методи оброблення розрахункових даних.

Метою статті є наукове обґрунтування алгоритму розрахунку та розроблення на його підґрунті методу розрахункової оцінки класу вогнестійкості будівельних конструкцій кабельних тунелів, що базується на математичному моделюванні.

Виклад основного матеріалу. Для математичного опису температурного режиму пожежі на гілці, що зростає, запропоновано використовувати формулу, яка наведена нижче і є удосконаленою модифікацією формули стандартного температурного режиму пожежі відповідно до стандарту [2] та робіт [1; 7], що було

масштабовано з урахуванням результатів, які отримані у попередніх дослідженнях [5–7].

$$\Theta_p = 20 + 345 \frac{\Theta_{e\max} - 20}{\Theta_{\max}} \lg[8t + 1] \quad (4)$$

де значення масштабування максимальної середньооб'ємної температури пожежі у формулі (4) визначається за виразом:

$$\Theta_{\max} = 20 + 345 \lg[8\tau_{\max} + 1] \quad (5)$$

Для представлення гілки, що спадає, температурного режиму пожежі можна використати формулу, яка відповідає лінійній залежності зменшення температури [6]:

$$\Theta_c = \Theta_{e\max} - \frac{\Theta_{e\max} - 20}{\tau_1 - \tau_{\max}} (t - \tau_{\max}) \quad (6)$$

Так:

$Q_{e\max}$ – максимальна середньооб'ємна температура;

τ_{\max} – час досягнення середньооб'ємної максимальної температури;

τ_1 – тривалість пожежі.

Вказані параметри обчислюються за виразами регресій, що були одержані після проведення повного факторного експерименту [5].

На рис. 1–3 наведені температурні режими пожеж, що були отримані для різних вхідних даних щодо конструкції та пожежного навантаження кабельних тунелів.

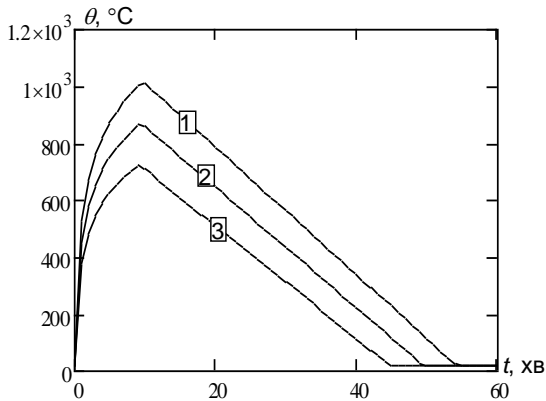


Рисунок 1 – Графіки температурних режимів пожежі за різних значень питомої теплоти згоряння пожежного навантаження (за незмінних значень площі поперечного перерізу тунелю $S = 3.64 \text{ м}^2$ та горизонтальної складової швидкості руху повітря у ньому $v_x = 2.5 \text{ м/с}$):

- 1 – $q_{t,d} = 2247 \text{ МДж/м}^2$;
- 2 – $q_{t,d} = 1236 \text{ МДж/м}^2$;
- 3 – $q_{t,d} = 224,7 \text{ МДж/м}^2$.

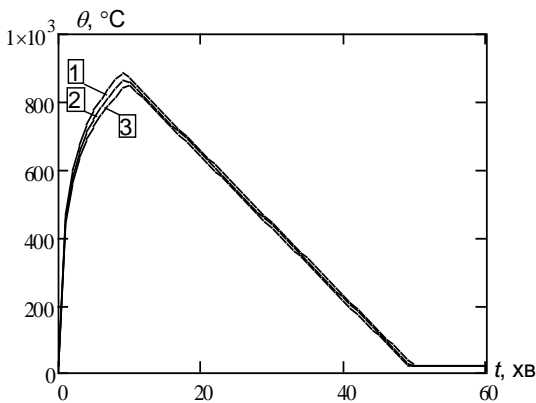


Рисунок 2 – Графіки температурних режимів пожежі за різних значень площі поперечного перерізу кабельного тунелю (за незмінних значень горизонтальної складової швидкості руху повітря $v_x = 2.5 \text{ м/с}$ та питомої теплоти згоряння пожежної навантаги $q_{t,d} = 1236 \text{ МДж/м}^2$):

- 1 – $S = 2.88 \text{ м}^2$;
- 2 – $S = 3.64 \text{ м}^2$;
- 3 – $S = 4.4 \text{ м}^2$.

Аналізуючи графіки, наведені на рис. 1–3, доходимо висновку, що найбільш впливовим фактором у кабельному тунелі у разі визначення температурного режиму пожежі є питома теплота згоряння пожежного навантаження. Менше впливає фактор горизонтальної складової швидкості руху повітря у тунелі.

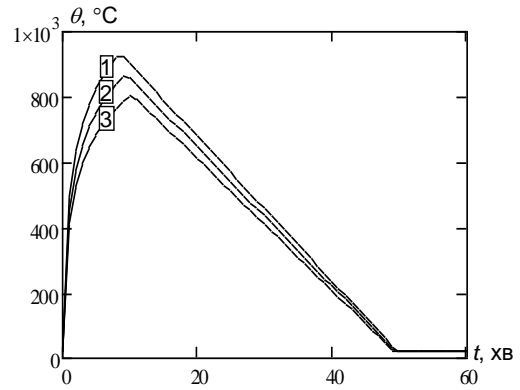


Рисунок 3 – Графіки температурних режимів пожежі за різних значень горизонтальної складової швидкості руху повітря у кабельному тунелі (за незмінних значень площі поперечного перерізу тунелю $S = 3.64 \text{ м}^2$ та питомої теплоти згоряння пожежної навантаги у ньому $q_{t,d} = 1236 \text{ МДж/м}^2$):

- 1 – $v_x = 0 \text{ м/с}$;
- 2 – $v_x = 2.5 \text{ м/с}$;
- 3 – $v_x = 5 \text{ м/с}$.

І найменш впливовим фактором є площа поперечного перерізу тунелю у межах визначеного діапазону, що був розглянутий у цій роботі.



Рисунок 4 – Розрахункова схема до теплового розрахунку огорожувальних конструкцій кабельного тунелю

Для здійснення розрахункової оцінки вогнестійкості огорожувальних залізобетонних конструкцій кабельних тунелів у разі використання розглянутих температурних режимів пожежі має бути визначено температуру прогріву огороження тунелю у будь-який момент часу пожежі. За таких умов конструкція може бути представлена у вигляді нескінченної пластини кінцевої товщини,

що обігривається з одного боку, і тоді можна використати розрахункову схему, яка наведена на рис. 4.

Для обчислення температури прогрівання огорожувальних конструкцій тунелів застосовується усталений підхід з використанням як базової моделі теплопровідності [3–7], що має вигляд (7).

$$c_{p,c}(\theta)\rho_c(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_c(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\right) \quad (7)$$

де $\lambda_c(\theta)$ – коефіцієнт теплопровідності бетону, що залежить від температури, Вт/(м·°C);

$\rho_c(\theta)$ – густина бетону, що залежить від температури, кг/м³; t – час, с;

$c_{p,c}(\theta)$ – питома теплоємність бетону, яка залежить від температури, Дж/(кг·°C).

Залежні від температури теплофізичні характеристики бетону – коефіцієнт теплопровідності, густина та питома

$$c_p(\theta)\rho_w(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t}\Big|_{i,k} = c_p(\theta_{i,k})\rho_w(\theta_{i,k})(\theta_{i,k} + \theta_{i,k+1}) \cdot \frac{\theta_{i,k+1} - \theta_{i,k}}{2\Delta t}. \quad (8)$$

Вираз часткової похідної правої частини рівняння теплопровідності через

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)\Big|_{i,k} = \frac{1}{\Delta x^2} [a_x\theta_{i-1,k}^x - (a_x + b_x)\theta_{i,k}^x + b_x\theta_{i+1,k}^x]. \quad (9)$$

Коефіцієнти у виразі (9) є коротким записом множників із коефіцієнтом теплопровідності та обчислюються у разі

$$a = \frac{\lambda_w(\theta_{i-1})\lambda_w(\theta_i)}{\lambda_w(\theta_{i-1}) + \lambda_w(\theta_i)}, \quad b = \frac{\lambda_w(\theta_{i-1})\lambda_w(\theta_i)}{\lambda_w(\theta_{i-1}) + \lambda_w(\theta_i)}. \quad (10)$$

Формули 8–10 надають можливість апроксимувати рівняння теплопровідності (7) алгебраїчними рівняннями у кінцевих різницях. Рівняння записуються у вигляді рекурентних формул для області вузлів розрахункової сітки у (k+1)-тий момент часу відповідно до показників температур, отриманих попередньо у k-тий момент часу.

теплоємність – встановлені відповідно до рекомендацій стандарту [3].

Інтегрування рівняння нестационарної теплопровідності у вказаному записі можливо провести у разі використання обчислювальних методів [3–4]. Для рівняння теплопровідності (7) застосована апроксимація за методом кінцевих різниць [7–8]. Для реалізації метода кінцевих різниць, під час інтегрування нестационарного рівняння теплопровідності (7) використаний інтегро-інтерполяційний метод, що наведено у [7–8]. За таких умов рівняння нестационарної теплопровідності (7) можна записати через лінійні алгебраїчні рівняння.

Ліва частина рівняння теплопровідності (7) із частковою похідною за часом за апроксимації кінцевими різницями у зазначеній точці записується у вигляді виразу (8).

кінцеві різниці (7) із відповідною точністю $O(\Delta h^2 + \Delta t)$ набуває вигляду (9).

застосування інтегро-інтерполяційного методу, наведеного у [7–8] через формули:

Зазначені рекурентні формули мають неявний вигляд та розв'язуються як рівняння.

Застосовуючи прийняті математичні моделі теплопередачі було проведено розрахунок температури у перерізі огороження із різною товщиною. Товщина варіювалася у межах, як наведено на рис. 5.

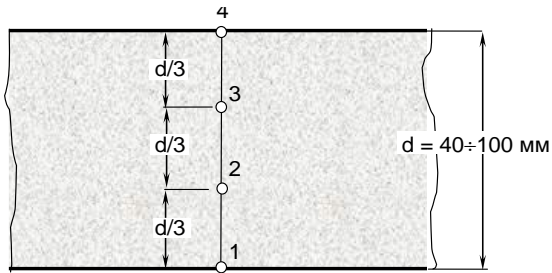


Рисунок 5 – Схема розташування контрольних точок для температурних показників їх прогрівання на загальному вигляді конструктивної розрахункової схеми огорожувальних конструкцій кабельних тунелів

Для розв'язання задачі теплопровідності відповідно до методу кінцевих різниць необхідно задати початкові дані. У розробленій методиці були встановлені такі початкові дані:

- початкова температура $\theta_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- часовий крок інтегрування – $\Delta t = 60 \text{ с}$;
- просторовий крок інтегрування $\Delta x = 0.005 \text{ м}$.

Як приклад алгоритму застосування розробленої методики (як режиму пожежі)

була використана температурна крива 2, що наведена на рис. 1, вона відповідає середнім значенням характеристик кабельних тунелів. Загалом температурний режим пожежі визначається для конкретного тунелю та залежить від його характеристик: пожежного навантаження, виду кабелів, що прокладені, геометричної та аеродинамічної конфігурацій.

Після проведення розрахунків з використанням табличного процесора Microsoft Excel були отримані результати у вигляді температурних режимів, наведених на рис. 6.

Згідно з аналізом результатів, наведених на рис. 6, температура на обігрівній стороні під впливом прийнятого температурного режиму пожежі (у цьому випадку крива 2 (рис. 1), яку було обрано для прикладу розрахунку за методикою) у кабельному тунелі не перевищує $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Це свідчить про те, що умови прогрівання за вказаного режиму є набагато м'якшими за умови стандартного температурного режиму пожежі.

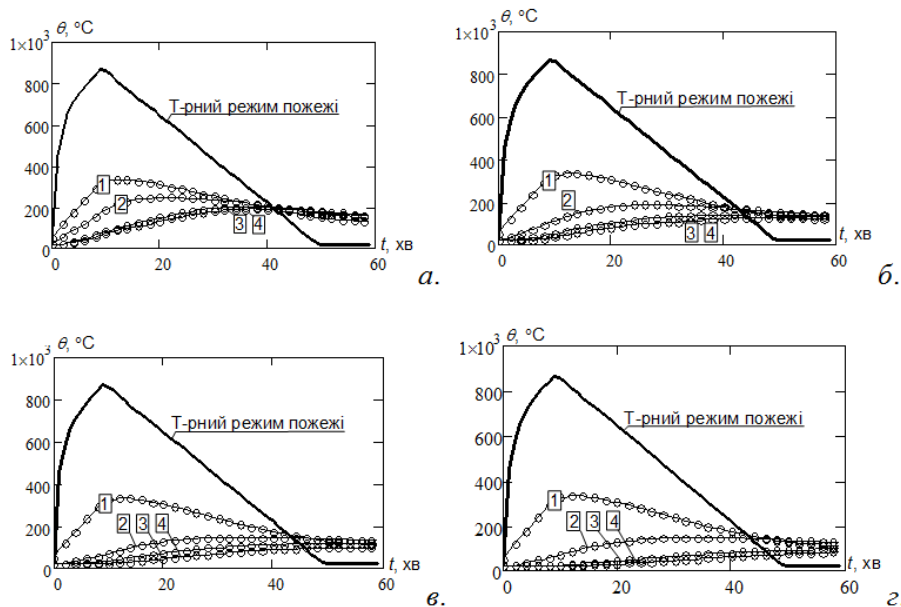


Рисунок 6 – Температурні режими прогрівання залізобетонних огорожувальних конструкцій кабельного тунелю (числові позначення відповідають номерам точок зі схеми на рис. 5) за постійних значень площі поперечного перерізу тунелю $S = 3.64 \text{ м}^2$, питомої теплоти згоряння пожежної навантажки $q_{t,d} = 1236 \text{ МДж/м}^2$ та горизонтальної складової швидкості руху повітря $v_x = 2.5 \text{ м/с}$ для різної товщини конструкції:

- а) 40 мм; б) 60 мм; в) 80 мм; г) 100 мм

Для порівняння отриманих результатів, наведених на рис. 6, були проведені розрахунки для теплового впливу пожежі із

стандартним температурним режимом. Отримані результати наведені на рис. 7.

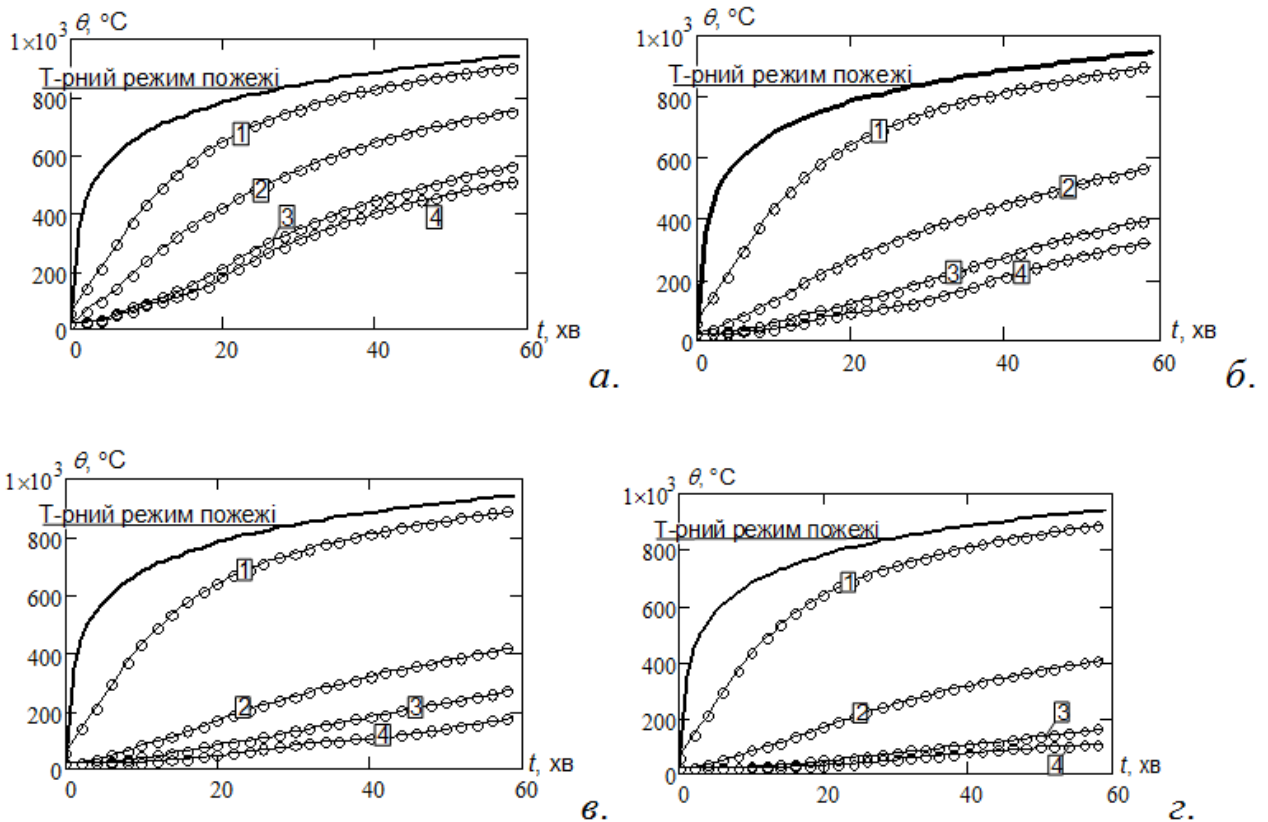


Рисунок 7 – Температурні режими прогрівання залізобетонних огорожувальних конструкцій кабельного тунелю (числові позначення відповідають номерам точок зі схеми на рис. 5) за умов стандартного температурного режиму пожежі для різної товщини конструкції:

а) 40 мм; б) 60 мм; в) 80 мм; г) 100 мм

З огляду на аналіз результатів, наведених на рис. 7, температура на обігрівній стороні під впливом прийнятого температурного режиму пожежі у кабельному тунелі вища за 400 °С. Це свідчить про те, що можуть бути обґрунтовані більш м'які умови пожежі і відповідно вища вогнестійкість. Для оцінки класу вогнестійкості огорожувальних залізобетонних конструкцій кабельного тунелю були побудовані розподіли температури по перерізу цих конструкцій. Побудовані розподіли наведені на рис. 8. Аналізуючи графіки на рис. 8, можна побачити, що лише огороження із товщиною стінки 40 мм не відповідає

вимогам щодо класів вогнестійкості EI 30, EI 45 та EI 60, оскільки температура на необігрівній стороні стінок огорожувальних конструкцій досягає значення, що більше за 140 °С (вважаємо цілісність огорожувальних конструкцій безпечною за умови дотримання вимог стандарту [2–4] щодо сушки та твердіння бетону).

З метою порівняння отриманих результатів, що наведені на рис. 8, були проведені розрахунки для теплового впливу пожежі зі стандартним температурним режимом. Було отримано результати, наведені на рис. 9.

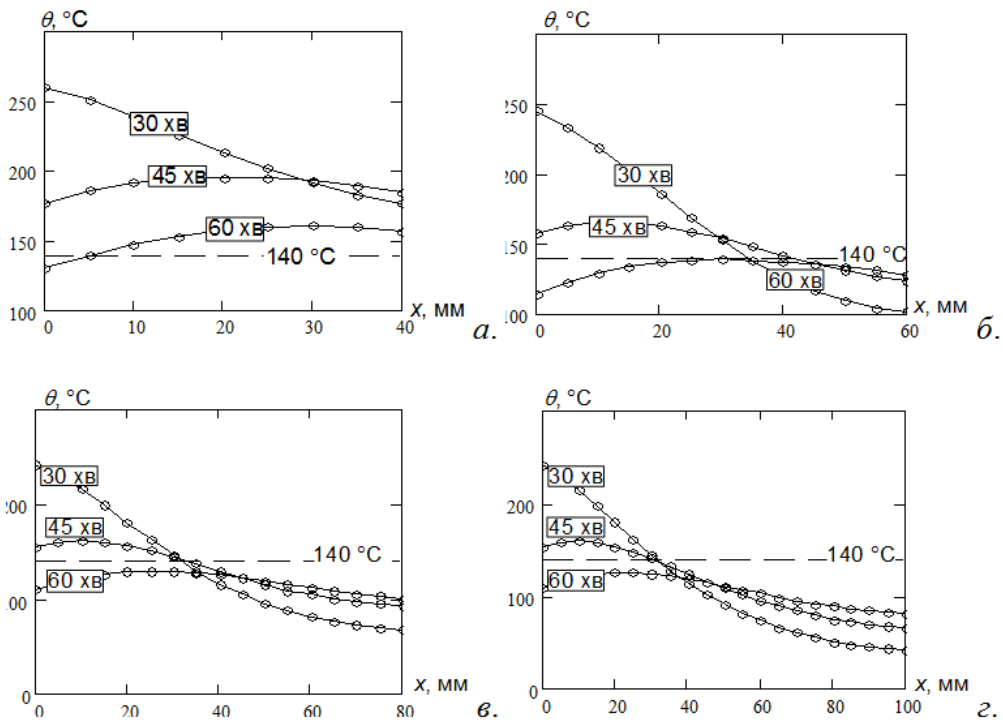


Рисунок 8 – Температурно-часові розподіли у перерізах залізобетонних огорожувальних конструкцій кабельного тунелю за постійних значень горизонтальної складової швидкості руху повітря $v_x = 2.5$ м/с, площі поперечного перерізу тунелю $S = 3.64$ м² та питомої теплоти згоряння пожежної навантаги $q_{t,d} = 1236$ МДж/м² для різної товщини конструкції:

а) 40 мм; б) 60 мм; в) 80 мм; г) 100 мм

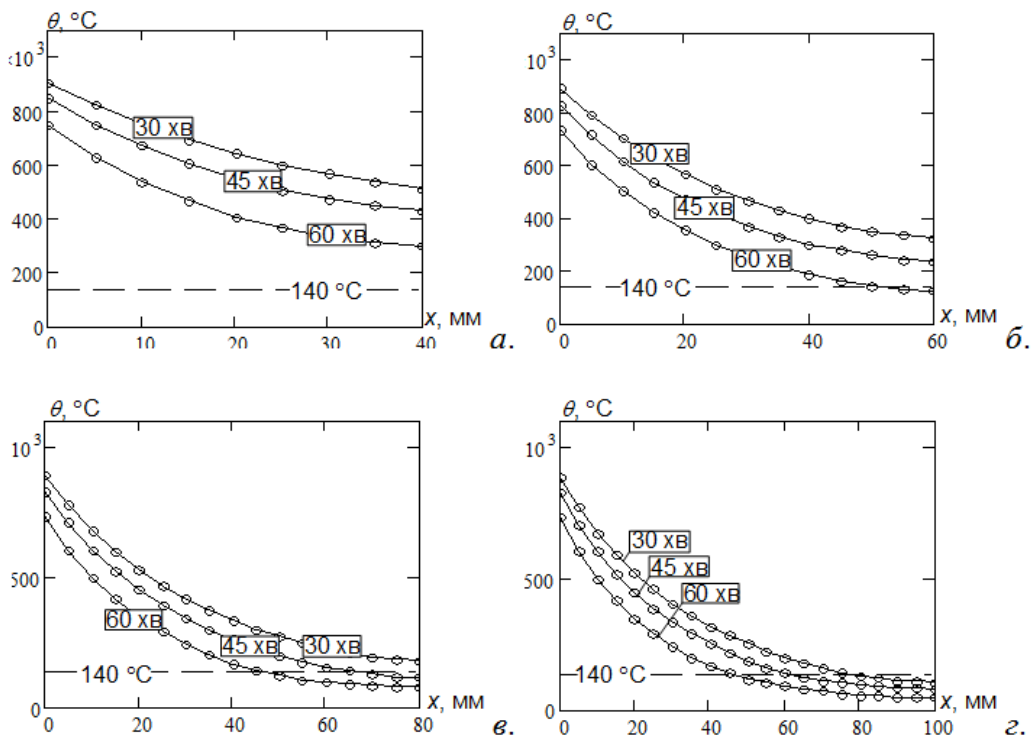


Рисунок 9 – Температурно-часові розподіли у перерізах залізобетонних огорожувальних конструкцій кабельного тунелю за умов стандартного температурного режиму пожежі із товщиною:

а) 40 мм; б) 60 мм; в) 80 мм; г) 100 мм

Згідно з аналізом графіків (рис. 9) тільки огороження кабельного тунелю товщиною 100 мм задовольняє вимоги усіх класів вогнестійкості EI 30, EI 45 та EI 60, тоді як стінки тунелю товщиною 80 мм відповідають EI 30 та EI 45, стінки тунелю товщиною 60 мм – тільки EI 30. Викладене показує переваги запропонованого підходу, оскільки дає змогу обґрунтувати вищі класи вогнестійкості для огороження з товщиною меншою за 80 мм.

З огляду на проведені дослідження було запропоновано рекомендації щодо розрахункової оцінки вогнестійкості залізобетонних огорожувальних конструкцій кабельних тунелів. Розроблена методика містить у своїй основі такі процедури:

1. За формулами (1) – (3) визначаються параметри для побудування температурної кривої режиму пожежі у кабельному тунелі: максимальна температура пожежі всередині, час її досягнення, а також тривалість пожежі.

2. За формулами (4) – (6) будується температурна крива режиму пожежі у кабельному тунелі.

3. У результаті розрахунку будуються розподіли температури у перерізі огороження кабельного тунелю в час, що відповідає необхідному класу вогнестійкості.

4. Якщо температура на необігрівній стороні не перевищує $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, можна робити висновок, що цілісність та теплоізолювальна здатність відповідають зазначеному класові вогнестійкості.

Висновки та напрями подальших досліджень.

1. Розраховано температурні режими прогрівання залізобетонних огорожувальних конструкцій кабельного тунелю (див. рис. 6) за постійних значень питомої площі поперечного перерізу тунелю $S = 3.64\text{ м}^2$, теплоти згоряння пожежної навантаги $q_{t,d} = 1236\text{ МДж/м}^2$, горизонтальної складової швидкості руху повітря в тунелі $v_x = 2.5\text{ м/с}$ для товщини конструкцій: 40 мм; 60 мм; 80 мм; 100 мм.

2. Проведено розрахунок межі вогнестійкості будівельних конструкцій стінки огороження кабельного тунелю товщиною: 40 мм; 60 мм; 80 мм; 100 мм. Відповідно до цих даних огороження товщиною 100 мм відповідають класам вогнестійкості EI 30, EI 45 та EI 60; стінки тунелю товщиною 80 мм – лише класам вогнестійкості EI 30 та EI 45; стінки тунелю товщиною 60 мм – класу вогнестійкості EI 30. Викладене доводить переваги запропонованого підходу, оскільки надає можливість обґрунтувати вищі класи вогнестійкості для конструкцій огороження товщиною меншою за 80 мм.

3. Науково обґрунтовано та перевірено алгоритм розрахунку, а також розроблено на його основі метод розрахункової оцінки класу вогнестійкості будівельних конструкцій кабельних тунелів, що базується на математичному моделюванні. Під час обчислення будуються розподіли температури по перерізу огороження кабельного тунелю у час, який відповідає необхідному класові вогнестійкості. Якщо температура на необігрівній стороні не перевищує $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, можна робити висновок, що цілісність та теплоізолювальна здатність відповідають вказаному класові вогнестійкості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М. : Пожарная безопасность и наука, 2001. 382 с.
2. ДСТУ Б В.1.1-4-98 ISO 834:1975. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість. Загальні вимоги. [Чинний від 1998-10-28]. Київ : Укрархбудинформ, 1999. 21с. (Державний стандарт України).
3. ДСТУ-Н EN 1991-1-2:2010 Єврокод 1 : Дії на конструкції – Частина 1–2 : Загальні дії – Дії на конструкції під час пожежі [Чинний від 2014-01-07]. Київ : ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК). 74 с.
4. EN 1992-1-2:2004+A1:2019 (2019) Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2 : General rules. Structural fire design, Brussels. 118 p.
5. Повний факторний експеримент з визначення температурних режимів пожежі у кабельних тунелях / О. М. Нуянзін та ін. *Надзвичайні ситуації : попередження та ліквідація*. 2019. Т. 3. № 6. С. 83–89.
6. Самченко Т. В. Оцінка джерел надходження радіонуклідів до організму мешканців сільських територій Полісся України : дис. ... д-р філософії : 261 / ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Черкаси, 2020. 171 с.
7. Методи математичного моделювання теплових процесів при випробуваннях на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій : монографія / О. М. Нуянзін та ін. Черкаси, 2015. 120 с.
8. Pozdieiev S. et al. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations. *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*, 2017. Т. 116. С. 02027.

REFERENCES

1. Rojzman V. M. (2001). Inzhenernye resheniya po ocenke ognestojkosti proektiruemyh i rekonstruiromykh zdaniy. M. : Associaciya «Pozharnaya bezopasnost' i nauka» [Engineering solutions for assessing the fire resistance of projected and reconstructed buildings]. M.: Association «Fire safety and science». 382 p. [in Russian].
2. DSTU B V.1.1-4-98. Zakhyst vid pozhezhi. Budivelni konstruktsiyi. Metody vyprovuvannya na vohnestiykist. Zahalni vymohy (ISO 834:1975) (1999). [Fire protection. Building constructions. Fire resistance test methods. General requirements]. Kyiv: Ukrarkhbuildinform, 21 s. [in Ukrainian].
3. DSTU-N EN 1991-1-2:2010 Yevrokod 1: Dii na konstruktсии – Chastyna 1-2: Zahalni dii – Dii na konstruktсии pid chas pozhezhi [Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions -Actions on structures exposed to fire] [in Ukrainian].
4. EN 1992-1-2:2004+A1:2019 (2019). Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1–2 : General rules. Structural fire design, Brussels. 118 p. [in English].
5. Nuianzin, O. M., Samchenko T. V., Peregin A. V., Krishtal V. M. (2019). Povnyi faktorny eksperyment z vyznachennia temperaturnykh rezhymiv pozhezhi u kabelnykh tuneliakh [A new factorial experiment on the determination of temperature conditions in the fire near cable tunnels]. *Nadzvychni situatsii : poperedzhennia ta likvidatsiia*. Т. 3. № 6. С. 83–89 [in Ukrainian].
6. Samchenko T. V. (2020). Otsinka dzherel nadkhodzhenia radionuklidiv do orhanizmu meshkantsiv silskykh terytorii Polissia Ukrainy [Estimation of sources of receipt of radionuclides to an organism of inhabitants of rural territories of Polissya of Ukraine]: Thesis ... Dr. of Philosophy: 261 / CHIPB them. Heroes of Chernobyl NUTSZ of Ukraine. Cherkasy. 171 p. *Metody matematychnoho modeliuвання teplovykh protsesiv pry vyprovuvanniakh na vohnestiikist zalizobetonnykh budivelnykh konstruktсии : monohrafiia* [in Ukrainian].
7. Nuianzin O. M., Nekora O. V., Pozdieiev S. V. [ta in.] (2019). *Metody matematychnoho modeliuвання teplovykh protsesiv pry vyprovuvanniakh na vohnestiikist zalizobetonnykh budivelnykh konstruktсии : monohrafiia* [Methods of Mathematical Modeling of Thermal Processes in Viproavannyh on the fire of concrete alarm constructions : monograph]. Cherkasy: CHIPB im. Heroes of Chornobil NUTSZ Ukraine. 120 p. [in Ukrainian].
8. Pozdieiev S. et al. (2019). Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations. *MATEC Web of Conferences. EDP Sciences*, 2017. Т. 116. P. 02027 [in English].