

УДК 614.841.45

ВИЗНАЧЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПІД ЧАС ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖ У ВЕРТИКАЛЬНИХ КАБЕЛЬНИХ ТУНЕЛЯХ АТОМНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.153-161>

Трошкін С. Е.^{1*}, ORCID iD 0000-0002-3795-2000

Поздєєв С. В.¹, ORCID iD 0000-0003-3370-9027

Некора О. В.¹, ORCID iD 0000-0002-5202-3285

Беліков А. С.², ORCID iD 0000-0001-5822-9682

*E-mail: sergeytroshkin455@gmail.com

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

²Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 30.09.2023

Пройшла рецензування:
15.10.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

атомна електрична станція,
контеймент, вертикальний
кабельний тунель,
математичне моделювання,
натурний експеримент, критерій
адекватності, температурний
режим пожежі.

АНОТАЦІЯ

Метою проведення досліджень є визначення особливостей процесів тепломасоперенесення під час реальної пожежі у вертикальних кабельних тунелях атомних електростанцій. Вивчення адекватності побудованих математичних моделей дасть змогу встановити ефективність моделювання теплових процесів для їх використання під час дослідження вогнестійкості огорожувальних конструкцій вертикальних кабельних тунелів атомних електростанцій. Для досягнення зазначеного на тренувально-спортивному комплексі 1-го Державного пожежно-рятувального загону Головного Управління ДСНС України у Запорізькій області з охорони об'єктів проведено натурні випробування і отримано дані про динаміку зміни температури у вертикальному кабельному тунелі з відомими геометричними параметрами та пожежним навантаженням. У програмному забезпеченні Fire Dynamics Simulator створена математична модель вертикального кабельного тунелю, яка аналогічна до натурної. Здійснено обчислювальний експеримент. Моделювання як метод наукового дослідження дає можливість проводити всі необхідні дослідження щодо визначення температурних режимів пожежі у вертикальних кабельних тунелях, не виконуючи матеріально витратних та трудомістких натурних експериментів на моделях. З огляду на результати обчислювального експерименту і натурних випробувань розраховано критерії адекватності. Для перевірки побудованої математичної моделі використовуються критерії Фішера, Стюдента та Кохрена. На основі проведеної наукової розвідки досліджено адекватність використовуваних математичних моделей. Аналізуючи порівняння дисперсії результатів математичного моделювання процесу тепломасообміну під час пожежі, можна констатувати, що жодне зі значень критеріїв адекватності не перевищило допустимих, а відносне відхилення склало 7,85%, що вказує на ефективність моделювання теплових процесів для проведення подальших досліджень температурних режимів пожежі у вертикальних кабельних тунелях атомних електричних станцій. У цій роботі дістало подальшого розвитку питання застосування обчислювальних експериментів для дослідження процесів тепломасообміну під час пожеж у вертикальних кабельних тунелях атомних електричних станцій.

Постановка проблеми. На енергетичних об'єктах пожежам у кабельному господарстві відводиться

особливе місце. Зазвичай вони призводять до зупинки або окремих вузлів і агрегатів, або всього об'єкта. Якщо пожежа зачіпає

систему управління і безпеки реакторної установки атомної електричної станції, може статися порушення герметичності контейменту і викид радіоактивних речовин в атмосферу, що може спричинити техногенну катастрофу світового масштабу. Найчастіше причиною виникнення пожеж є короткі замикання, перевантаження, ушкодження ізоляції, великі перехідні опори в контактах тощо. Розвитку пожеж у кабельних тунелях сприяє ряд факторів [1–3]: наявність великого пожежного навантаження – горючої ізоляції; прогрів електрокабелів на всій довжині внаслідок проходження струму; прогрів електрокабелів перед прокладанням по кабельним лініям; складне конструктивне виконання кабельних споруд (наявність розгалуженої мережі кабельних тунелів), поверхів, наявність вертикальних кабельних тунелів.

Особливістю пожеж у кабельних тунелях є стрімке поширення пожежі. Швидкість поширення горіння в кабельних тунелях під час прокладання кабелів по металевих кронштейнах і знятого в просторі навантаження становить 0,1–0,3 м/хв, а в кабельних напівповерхах – 0,2–0,4 м/хв. За наявності напруги на кабелях швидкість поширення горіння може досягати 1,2 м/хв. Пожежі в кабельних приміщеннях відрізняються порівняно високою швидкістю наростання об'ємної температури – 30–40 °С/хв, яка залежить від обсягу і величини пожежного навантаження. Їх розвиток у кабельних тунелях супроводжується інтенсивним виділенням високотоксичних продуктів згоряння, які швидко заповнюють весь обсяг кабельного приміщення і створюють додатковий прогрів ізоляції кабелів, що призводить до різкого збільшення лінійної швидкості поширення полум'я. Крім того, необхідно враховувати, що продукти горіння за невеликих швидкостей повітряного потоку (до 0,6 м/хв.) здатні поширюватися проти цього потоку.

Дослідження температурного режиму пожежі із проведенням реальних пожеж є актуальним питанням [4–6], оскільки вертикальні кабельні тунелі відрізняються

геометричною конфігурацією, видом кабелів, що прокладені у них, пожежним навантаженням та аеродинамічними характеристиками. Це призводить до того, що температурний режим пожежі у таких тунелях може відрізнятися від стандартного температурного режиму пожежі, визначеного відповідно до ДСТУ Б В.1.1-4. Відомим прикладом відмінності від стандартного є дослідження ТНО з отриманою температурною пожежною кривою RWS [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори в роботах [8–9] перевіряли на адекватність математичні моделі теплових процесів розвитку і гасіння пожеж у будівлях, приміщеннях та тунелях, використовуючи різні спеціалізовані програмні забезпечення. Обґрунтовано та підтверджено адекватність побудованих математичних моделей із подальшим вивченням температурного режиму пожежі. В роботі [7] наведено результати досліджень, що стосувалися температурного впливу пожежі в тунелі Рунехамп у Норвегії. Зазначено, що дослідження ТНО підтвердили попередні результати, отримані в 1979 році в Нідерландах. У праці (розділ VII.3 «Вогнева реакція матеріалів» звіту 1999 р. 05.05.Б «Контроль вогню та диму в тунелях») обговорюються характеристики скельних тунельних облицювань та порівнюються із залізобетонними. Інтенсивність тепла, що виділяється під час великої пожежі, може призвести до того, що огорожувальна конструкція тунелю втратить свою несучу функцію. Але порівнявши температурно-часові залежності пожеж, з'ясувалось, що виникають об'єктивні труднощі, пов'язані з визначенням вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій кабельних тунелів атомних електричних станцій, оскільки основним методом визначення вогнестійкості будівельних конструкцій згідно зі встановленими вимогами ДСТУ Б В.1.1-4 є метод випробувань за стандартним температурним режимом пожежі.

Формулювання цілей дослідження. Метою роботи є перевірка адекватності побудованої моделі пожежі у вертикальному кабельному тунелі, створеному в програмному забезпеченні «Fire Dynamics Simulator 6.7.9» на основі проведеного натурного експерименту для їх подальшого використання під час вивчення впливу пожежного навантаження та конструктивних характеристик вертикальних кабельних тунелів атомних електричних станцій на температурний режим пожежі.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі задачі:

1. Проаналізувати отримані експериментальні дані натурного випробування та описати математичну модель вертикального кабельного тунелю атомної електричної станції, створену у програмному комплексі «Fire Dynamics Simulator».

2. Визначити критерії адекватності математичних моделей пожеж у кабельних тунелях, створених у програмному комплексі «Fire Dynamics Simulator 6.7.9» на основі експериментальних даних (t-критерій Стюдента, Q-критерій Кохрена, F-критерій Фішера).

3. Визначити придатність математичної моделі до відтворення процесів тепломасоперенесення під час пожежі у кабельних тунелях.

Виклад основного матеріалу. На тренувально-спортивному комплексі 1-го Державного пожежно-рятувального загону Головного Управління ДСНС України у

Запорізькій області з охорони об'єктів проведено натурні вогневі випробування. Для підвищення достовірності результатів було здійснено три експерименти. Тривалість кожного з них склала 5400 с. На рис. 1 наведено вигляд кабелів у відповідній секції вертикального кабельного тунелю для формування пожежного навантаження.



Рисунок 1 – Вигляд вертикально встановлених кабелів, зафіксованих у спеціальних кабельних кронштейнах для формування наявного пожежного навантаження

Джерело матеріалу: розроблено авторами

На рис. 2 показано вигляд вертикального кабельного тунелю у процесі експериментальних досліджень. Горючим матеріалом електричного кабелю є полівінілхлорид (ПВХ), матеріал який перебуває в зоні теплового впливу – сталеві кронштейни та металеві дроти кріплення з маркою сталі якості Ст. 3сп.



Рисунок 2 – Фото кабельного тунелю під час проведення експерименту



Джерело матеріалу: розроблено авторами

Як джерело запалювання кабелів використовується модельне вогнище класу пожежі 32В у вигляді піддона. Параметри джерел запалювання: висота піддона осередку пожежі 32В – 200 мм; розміри осередку пожежі – 1000х1000 мм (площа пожежі 1,0 м²); дизельне паливо 30 л; бензин автомобільний 2 л; кількість води в піддоні – 20 л. Як горюча рідина використовується дизельне паливо марки ДП-3-Евро5-В0, бензин марки А-92-Євро5-Е0. Враховуючи конфігурацію зони розвиненої пожежі, розташовано

контрольно-вимірювальну арматуру – температурні датчики на відстані від стіни в 500 мм. Як температурні датчики застосовуються хромель-алюмелеві термопари в комплекті з контрольною інфраструктурою для ідентифікації температурних даних з температурних датчиків. Похибка вимірювання термопар складає ± 1 С. Схема розташування термопар у вертикальному кабельному тунелі наведена на рис. 3.

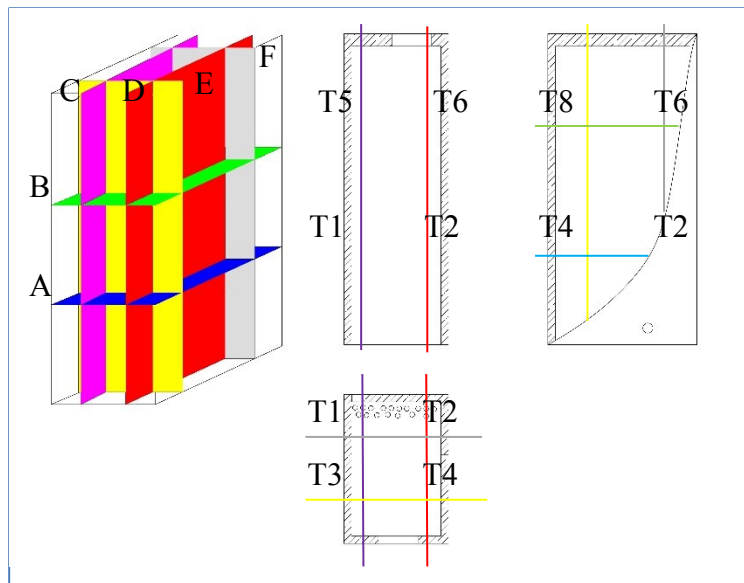
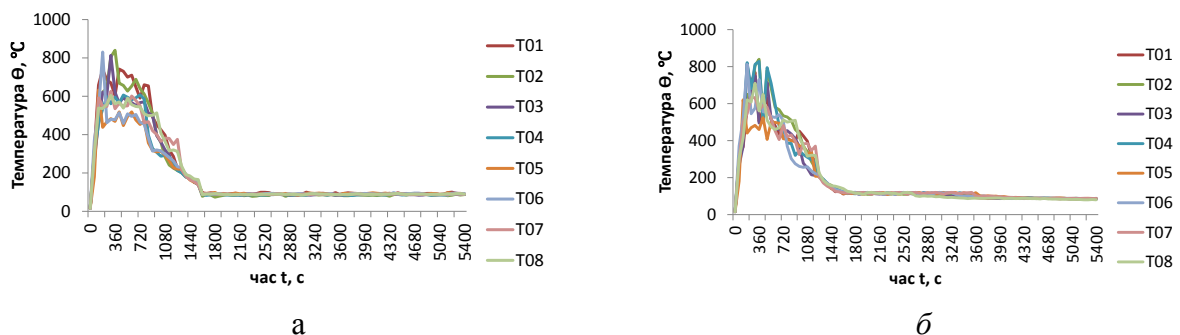
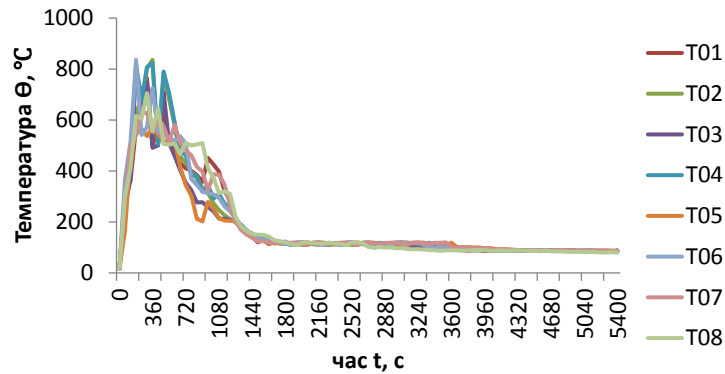


Рисунок 3 – Схема розташування термопар по вимірювальним площинам на поверхсі вертикального кабельного тунелю атомної електричної станції, відмітка 13,200 м

Джерело: розроблено авторами

Випробування здійснено за температури +16 °С та відносної вологості повітря 48%, що відповідає ДСТУ Б В.1.1-4 та ДСТУ Б В.1.1-18. Протягом 5400 с проводилися вимірювання температури (рис. 4).





б

Рисунок 4 – Температурно-часова залежність за результатами: а – першого експериментального дослідження; б – другого експериментального дослідження; в – третього експериментального дослідження; щодо кожної з восьми встановлених термопар (рис. 3)

Джерело: узагальнено авторами

Аналізуючи температурно-часові залежності за результатами трьох експериментальних досліджень у вертикальному кабельному тунелі (рис. 4), можна констатувати, що найвища температура спостерігається в зоні площини D в межах 800–900 °C. Теплова енергія поширюється інтенсивніше в бік заповнення простору протилежному до заповнення отвору виходу продуктів горіння та отворів вентиляції. Температура у зоні площини C перебуває в межах 500–800 °C.

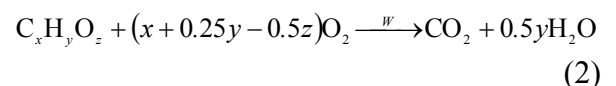
Програма «Fire Dynamics Simulator» використовувалася для вирішення широкого спектра наукових і прикладних задач тепломасоперенесення під час пожежі [10]. Fire Dynamics Simulator чисельно розв'язує рівняння Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурозалежних потоків. Зважаючи на складність процесів, що проходять під час пожеж у вертикальних кабельних тунелях, найбільш доцільно використовувати польові моделі, що спираються під час розрахунків на повну систему рівнянь Нав'є-Стокса. У векторному вигляді для нестисливої рідини вони записуються в такий спосіб (1):

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \vec{f}, \quad (1)$$

де: $\vec{f}$ – векторне поле масових сил. Невідомі ρ і ν є функціями часу t і координати

$\vec{v} = (v^1, \dots, v^n)$ – векторне поле швидкостей; ∇ – оператор Гамільтона; Δ – оператор Лапласа; t – час; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості; ρ – щільність; p – тиск; $n = 2, 3$ – плоска або тривимірна область, у якій рухається рідина.

Модель горіння визначають за витратами палива, окисника і продуктів згорання [11–12]. Кількісні співвідношення визначені за узагальненим хімічним рівнянням (2):



Використовуються рівняння, що враховують радіаційний теплообмін у газовому середовищі та взаємного теплообміну між середовищем і частками, а також твердим матеріалом. Модель побудована на припущенні, що оптичне середовище ізотропне, процес радіаційного теплоперенесення описаний рівнянням (3):

$$\nabla \left(\frac{1}{\alpha + \beta} \nabla E_r \right) + 3(\alpha E_b - \alpha E_r) = 0, \quad (3)$$

де: E_r – густина енергії випромінювання; E_b – рівноважна густина енергії випромінювання.

Загалом наявні математичні моделі та їх чисельна реалізація дають змогу точно й ефективно змодельовати процес тепломасоперенесення у вертикальному кабельному тунелі атомної електростанції.

Для проведення обчислювального експерименту з використанням створеної математичної моделі для випробувань застосована наведена вище послідовність розрахункових процедур. Після завершення обчислювального

експерименту отримано дані температур з кожного місця контролю (рис. 3) для визначення адекватності математичної моделі.

Для наочності процесів прогрівання простору кабельного тунелю під час обчислювального експерименту в комп'ютерній моделі створені площини, на яких значення температури візуалізується за допомогою кольорів (залівки температури), що вказано на рис. 5.

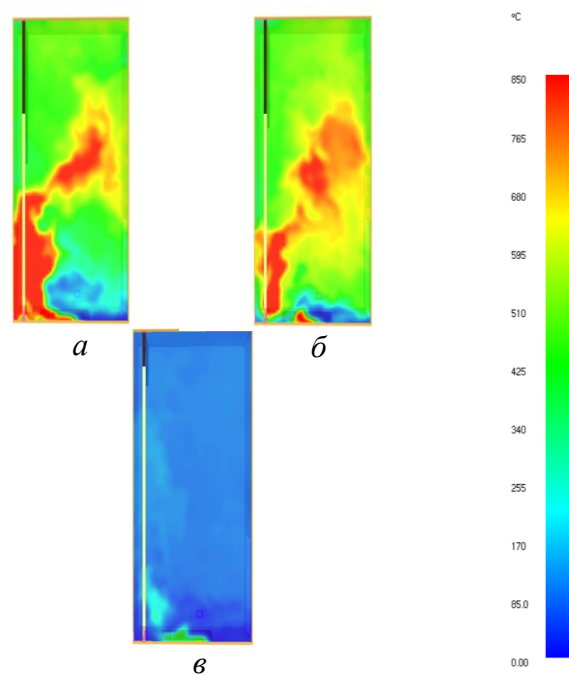


Рисунок 5 – Градієнт температур площини D (рис. 3) у просторі моделі кабельного тунелю: а – 6 хвилина, б – 12 хвилина, в – 18 хвилина

Джерело: розроблено авторами

Ураховуючи розподіл температур (рис. 5), умовно можна поділити пожежу у вертикальному кабельному тунелі на чотири етапи (рис. 6).

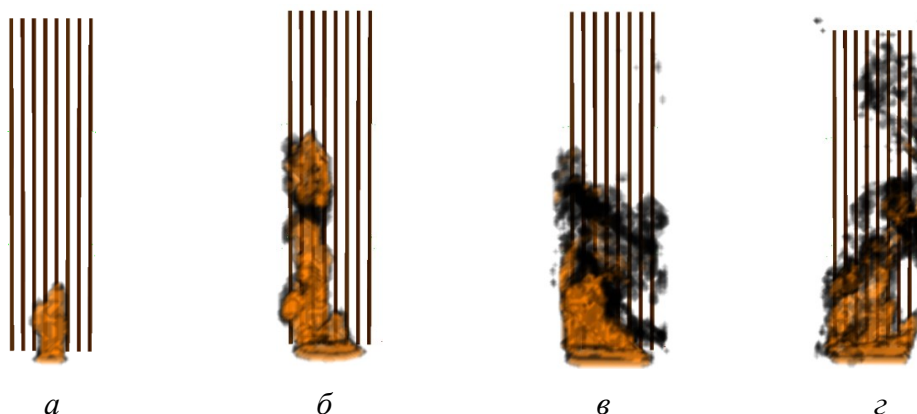


Рисунок 6 – Основні етапи розвитку пожежі у вертикальному кабельному тунелі: а – 1 етап, початковий розвиток пожежі; б – 2 етап, охоплення полум'ям кабелів на кронштейнах; в – 3 етап, перехідний до етапу розвиненої пожежі; г – 4 етап, розвинена пожежа

Джерело матеріалу: розроблено авторами

На рис. 7 побудовано графіки середньої температури в різних частинах кабельного тунелю під час обчислювального експерименту.

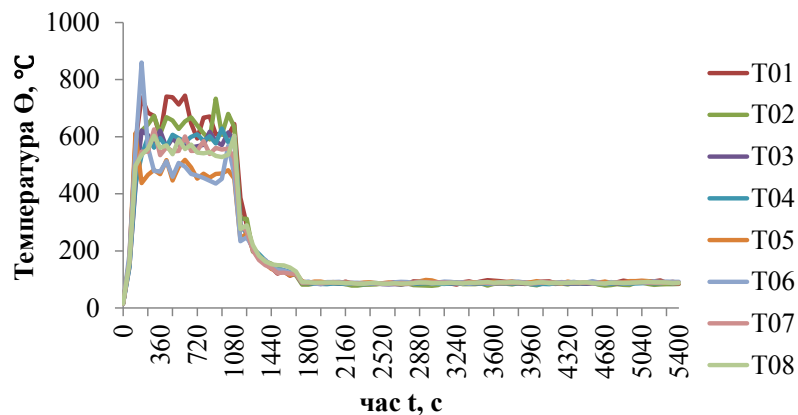


Рисунок 7 – Температурна залежність від часу у вертикальному кабельному тунелі атомної електростанції за результатами обчислюваного експерименту щодо кожної з восьми встановлених термопар

Джерело: узагальнено авторами

Для перевірки адекватності результатів моделювання використані такі критерії адекватності (4) – (9): F-критерій Фішера, t-критерій Стюдента та Q-критерій Кохрена.

– F-критерій Фішера (4):

$$F = \frac{S_{xy}^2}{S_y^2}, \quad (4)$$

де: S_{xy}^2 – дисперсія адекватності, S_y^2 – дисперсія відтворюваності.

Дисперсія адекватності розраховувалася (5) як відхилення між розрахунковими й експериментальними даними щодо кожної з термопар, встановленої під час проведення натурального експерименту, і відповідного їй місця виміру температури в математичній моделі:

$$S_{xy}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i + y_i)^2}{n}, \quad (5)$$

де n – кількість замірів температури, y_i – значення розрахункового показника під час моделювання, x_i – значення експериментального показника під час випробування.

Дисперсія відтворюваності розраховувалася (6) як відхилення між

результатами двох натурних експериментів з урахуванням експериментальної похибки [13]:

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{y}| - 16)^2, \quad (6)$$

де: n – кількість замірів температури, $\bar{y}$ – температура другого натурального експерименту, y_i – температура першого натурального експерименту.

– t-критерій Стюдента, застосовується для порівняння результатів реального й обчислювального експериментів (7), (8):

$$t = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (7)$$

$$\bar{y}_{1,2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i. \quad (8)$$

– Q-критерій Кохрена (9):

$$Q = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^p S_i^2}. \quad (9)$$

Аналізуючи порівняння дисперсії результатів математичного моделювання процесу теплообміну під час пожежі у тунелі (табл. 1), можна констатувати, що жодне зі значень критеріїв адекватності не перевищує допустимих.

Таблиця 1. Параметри дисперсії результатів математичного моделювання процесу теплообміну під час пожежі у вертикальному кабельному тунелі від експериментальних даних

Критерії адекватності	Зона термопар (рис. 3)								Критичне значення [13]
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	
F-критерій	0,94	0,98	1,26	1,47	2,12	1,77	1,42	1,40	2,28
t-критерій	0,58	0,11	0,68	1,13	0,73	1,38	0,43	0,13	1,65
Q-критерій	0,338	0,337	0,336	0,337	0,345	0,34	0,338	0,34	0,43

Джерело матеріалу: узагальнено авторами

Аналізуючи порівняння дисперсії результатів математичного моделювання процесу теплообміну під час пожежі у кабельному тунелі та експериментальних даних (табл.1), можна констатувати, що жодне зі значень критеріїв адекватності не перевищує допустимих, відносно відхилення складає 7,85%. Це доводить ефективність моделювання теплових процесів для проведення подальших досліджень температурних режимів пожежі у вертикальних кабельних тунелях АЕС.

Висновки і напрями подальших досліджень. З огляду на результати обчислювального експерименту і натурних випробувань розраховано критерії адекватності. За критичних значень F-критерія Фішера – 2,28, t-критерія Стюдента – 1,65, Q-критерія Кохрена – 0,43 [13] їх середні значення становили: 1,42; 0,65 та 0,33 відповідно, а максимальне значення не перевищило критичне. Аналізуючи порівняння дисперсії результатів математичного моделювання процесу теплообміну під час пожежі (табл. 1), можна констатувати, що жодне зі значень критеріїв адекватності не перевищує допустимих, а відносно відхилення складає 7,85%. Це вказує на ефективність моделювання теплових

процесів для проведення подальших досліджень температурних режимів пожежі у вертикальних кабельних тунелях атомних електричних станцій.

Зазначені дослідження спрямовані на аналіз процесу тепломасоперенесення під час реальних пожеж у вертикальних кабельних тунелях атомної електростанції. Результати цієї розвідки вказують на ефективність моделювання теплових процесів у таких умовах та мають важливе застосування в галузі безпеки атомних електростанцій. Під час проведення експерименту враховували геометричні, аеродинамічні параметри та пожежне навантаження. Отримані результати дослідження процесу тепломасоперенесення у вертикальних кабельних тунелях атомної електростанції мають практичну значущість для покращення безпеки станцій та розроблення нових технологій у галузі безпеки. Надалі роботу доцільно спрямувати на дослідження вогнестійкості будівельних конструкцій вертикальних кабельних тунелів атомної електростанції із врахуванням температурних режимів пожежі, отриманих за допомогою повного факторного експерименту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang P. et al. Experimental study on the interaction between fire and water mist in long and narrow spaces. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Т. 94. С. 706–714.
2. Nuyanzin O., Pozdieiev S., Samchenko T. [et al.]. Experimental study of temperature mode of a fire in a cable tunnel. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 3/10 (93). С. 21–27.
3. Трошкін С. Е., Неділько І. А., Удовенко М. Ю. Дослідження поведінки сталезалізобетонної плити за умови впливу стандартного температурного режиму пожежі. *Наука про цивільний захист, як шлях становлення молодих вчених* : зб. матеріалів доп. учасн. Всеукр. наук.-практ. конф. Черкаси : ЧПБ НУЦЗУ, 2022. С. 65–66.
4. Серия норм МАГАТЭ по безопасности. Пожарная безопасность при эксплуатации атомных электростанций. № NS-G-2.1.
5. EN 1991-1-2:2010 Eurocode 1 : Actions on structures. Part 1–2 : General actions – Actions on structures exposed to fire.
6. EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2 : Design of concrete structures. Part 1–2 : General rules – Structural fire design, Brussels, 2004.
7. Chapter VII.4 «Fire resistance of structures» of technical report 1999 05.05.B «Fire and Smoke Control in Tunnels».
8. Трошкін С. Э., Сидней С. А., Тищенко Е. А., Некора О. В. Исследование адекватности результатов математического моделирования динамики пожара в помещении с помощью программного комплекса FDS. *Пожарная безопасность : теория и практика*. Черкассы : ЧПБ, 2015. № 20. С. 104–109.

9. Ковалишин В. В. Перевірка на адекватність моделювання процесів розвитку і гасіння пожеж в кабельних тунелях (в обмежених об'ємах). *Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки*. Київ : УкрНДІПЗ, 2013. № 1(27). С. 38–44.
10. Forney G. P. User's Guide for Smokeview Version 5-A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data : National Institute of Standards. P. 234.
11. Основи теорії розвитку і припинення горіння : підруч. / Г. І. Єлагін, Г. І. Єлагін, М. Г. Шкарабура, М. А. Кришталь, О. М. Тищенко. Вид. 3-тє, випр. і доп. Черкаси : Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, 2013. 460 с.
12. Методи математичного моделювання теплових процесів при випробуваннях на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій : монографія / О. М. Нуянзін, О. В. Некора, С. В. Поздєєв [та ін.]. Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. 120 с.
13. Організація наукових досліджень (Статистичні методи. Аналіз та оформлення наукових досліджень) : методичні вказівки до науково-дослідницької практики з дисципліни / І. І. Капцов та ін. Харків : ХНАМГ, 2009. 59 с.

REFERENCES

1. Zhang, P. et al. Experimental study on the interaction between fire and water mist in long and narrow spaces. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Т. 94. С. 706–714.
2. Nuyanzin, O., Pozdieiev, S., Samchenko, T. et al. Experimental study of temperature mode of a fire in a cable tunnel. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 3/10 (93). С. 21–27.
3. Troshkin, S. E., Nedilko, I. A., Udovenko, M. Yu. Doslidzhennia povedinky stalezalizobetonnoi plyty za umovy vplyvu standartnoho temperaturnoho rezhymu pozhazhi. *Nauka pro tsyvilnyi zakhyst, yak shliakh stanovlennia molodykh vchenykh: zb. materialiv dop. uchasn. Vseukr. nauk.-prakt. konf. Cherkasy: ChIPB NUTsZU*, 2022. S. 65–66.
4. Seryia norm MAHATo po bezopasnosty. Pozharnaia bezopasnost pry ekspluatatsii atomnykh elektrostantsyi. № NS-G-2.1.
5. EN 1991-1-2:2010 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions -Actions on structures exposed to fire.
6. EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2004;
7. Chapter VII.4 «Fire resistance of structures» of technical report 1999 05.05.B «Fire and Smoke Control in Tunnels».
8. Troshkin, S. E., Sydnei, S. A., Tyshchenko, E. A., Nekora, O. V. Yssledovanye adekvatnosti rezultatov matematycheskogo modelirovaniya dynamiki pozhara v pomeshcheniy s pomoshchiu proghrammnoho kompleksa FDS // *Pozharnaia bezopasnost: teoriya y praktika* – Cherkassy: ChYPB, 2015 (20), S.104 –109.
9. Kovalyshyn, V. V. Perevirka na adekvatnist modeliuvannia protsesiv rozvytku i hasinnia pozhazh v kabelnykh tuneliakh (v obmezhenykh ob'iemakh // *Naukovyi visnyk Ukrainskoho naukovogo-doslidnoho instytutu pozhazhnoi bezpeky*. Kyiv: UkrNDITsZ, 2013. № 1(27). S. 38–44.
10. Forney, G. P. User's Guide for Smokeview Version 5-A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data: National Institute of Standards. P. 234.
11. Yelahir, H. I., Yelahir, H. I., Shkarabura, M. H., Kryshthal, M. A., Tyshchenko, O. M. Osnovy teorii rozvytku i prypynennia horinnia: pidruchnyk / 3-tie vyd., vypr. i dop. Cherkasy: Akademiia pozhazhnoi bezpeky imeni Heroiv Chornobylia, 2013. 460 s.;
12. Nuianzin O. M., Nekora O. V., Pozdieiev S. V. [ta in.]. Metody matematychnoho modeliuvannia teplovykh protsesiv pry vyprobuvanniakh na vohnestiikist zalizobetonnykh budivelnnykh konstruksii: monohrafiia. Cherkasy: ChIPB im. Heroiv Chornobylia NUTsZ Ukrainy, 2019. 120 s.
13. Metodychni vkazivky do naukovogo-doslidnytskoi praktyky z dystsypliny «Orhanizatsiia naukovykh doslidzhen» (Statystychni metody. Analiz ta oformlennia naukovykh doslidzhen) / I. I. Kaptsov ta in. Kharkiv: KhNAMH, 2009. 59 s.

DETERMINATION OF ADEQUACY OF MATHEMATICAL MODELS FOR HEAT TRANSFER DURING FIRE INCIDENTS IN VERTICAL CABLE TUNNELS OF NUCLEAR POWER PLANTS

S. Troshkin, S. Pozdieiev, O. Nekora, A. Belikov

¹*Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chernobyl, National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

²*Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine*

KEYWORD

S:

nuclear power plant, containment, vertical cable tunnel, mathematical modeling, natural experiment, adequacy criterion, fire temperature regime.

ANNOTATION

The aim of this research is to identify the characteristics of heat transfer processes during real fires in vertical cable tunnels of nuclear power plants. Studying the adequacy of constructed mathematical models will enable the assessment of the effectiveness of thermal process modeling for use in researching the fire resistance of vertical cable tunnel enclosures in nuclear power plants. To achieve this goal, natural experiments were conducted and data on the temperature dynamics in a vertical cable tunnel with known geometric parameters and fire loads were obtained at the training and sports complex of the 1st State Fire and Rescue Unit of the Main Directorate of the State Emergency Service of Ukraine in Zaporizhzhia Region. A mathematical model of the vertical cable tunnel, similar to the physical one, was created in the Fire Dynamics Simulator software, followed by a computational experiment. Modeling, as a method of scientific research, allows for conducting all necessary experiments regarding the determination of temperature regimes during fires in vertical cable tunnels without the need for expensive and labor-intensive physical experiments on models. Based on the results of the computational experiment and natural tests, adequacy criteria were calculated. Fisher, Student, and Cochran criteria are used to validate the constructed mathematical model. An analysis of the adequacy of the mathematical models used was conducted. By comparing the dispersion of the results of mathematical modeling of the heat and mass transfer process during a fire, it can be observed that none of the adequacy criteria values exceeded permissible limits, and the relative deviation was 7.85%, indicating the effectiveness of modeling thermal processes for further research into temperature regimes during fires in vertical cable tunnels of nuclear power plants. This work contributes to the further application of computational experiments for studying heat and mass transfer processes during fires in vertical cable tunnels of nuclear power plants.