

УДК 614.841.45

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.241.255>

Сергій ТРОШКІН¹ (ORCID: 0000-0002-3795-2000),

Микола СУР'ЯНИНОВ², доктор технічних наук, професор
(ORCID: 0000-0003-2592-5221),

Діана ТРОШКІНА³ (ORCID: 0009-0002-1444-748X),

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

²Одеська державна академія будівництва та архітектури,

³ГУ ДСНС України у Запорізькій області

ПРОВЕДЕННЯ ПОВНОГО ФАКТОРНОГО ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПРИ ПОЖЕЖІ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ КАБЕЛЬНОМУ ТУНЕЛІ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

Дослідження температурного режиму пожежі є актуальним питанням, так як вертикальні кабельні тунелі відрізняються геометричною конфігурацією, видом кабелів, що прокладені у них, пожежним навантаженням та аеродинамічними характеристиками. Це призведе до того, що стандартний температурний режим пожежі не може забезпечити відповідність вогнестійкості огорожуваних конструкцій. Варіантом подолання труднощів є проведення повного факторного обчислювального експерименту щодо визначення температурного режиму пожежі на повномасштабних моделях. В роботі було розроблено та проведено повний факторний експеримент із отриманням регресії максимальної температури, тривалості пожежі та часу досягнення максимальної температури.

Ключові слова: пожежа, атомна електрична станція, контаймент, вертикальний кабельний тунель, температурний режим пожежі.

Постановка проблеми. На даний час на чотирьох атомних електричних станціях України експлуатуються 15 енергоблоків із загальною встановленою потужністю 13 835 МВт, що складає 55,2% від сумарної встановленої потужності всіх електростанцій країни. Внаслідок виникнення можливих аварійних ситуацій на об'єктах підвищеної небезпеки та потенційно небезпечних об'єктах створений «Глибоко ешелований захист» відповідно до міжнародних дослідів та створенням міжнародної організації МАГАТЕ за для забезпечення радіаційної та фізичної безпеки. Головним бар'єром захисту від радіаційної небезпеки об'єкту є контаймент [1].

На атомних електричних станціях знаходиться велика кількість спеціальних різних приміщень, одним з них є вертикальний кабельний тунель. Тунелі забезпечують прокладку кабелів різних діаметрів для різних призначень. Починаючи з телекомунікаційних систем закінчуючи систем безпеки реактору та систем внутрішньої безпеки атомної електричної станції. Вертикальний кабельний тунель знаходиться в облаштуванні реакторного відділення та з'єднує важливі комунікаційні елементи реакторної установки з контайментом по всій його висоті, кабельний тунель розділений на протипожежні відсіки висотою не більше ніж 6 метрів, протяжність кабельного тунелю становить 25 метрів починаючи з відмітки 20,000 метрів реакторного відділення блоку ВВЕР. Конструкції вертикального кабельного тунелю повинні мати відповідні ступені вогнестійкості: несучі стіни вертикального кабельного тунелю повинні мати ступінь вогнестійкості не менше ніж 90 хвилин, ступінь вогнестійкості залізобетонних плит покриття вертикального кабельного тунелю повинно становити –

ЕІ45 [2,3]. Кабелі, які проходять від контайменту в корпусі вертикального кабельного тунелю, прокладають у трубах, виводять кабелі до кабельного тунелю та в приміщення на різних відмітках, починаючи з 20,000 метрів навколо контайменту (рис.1).

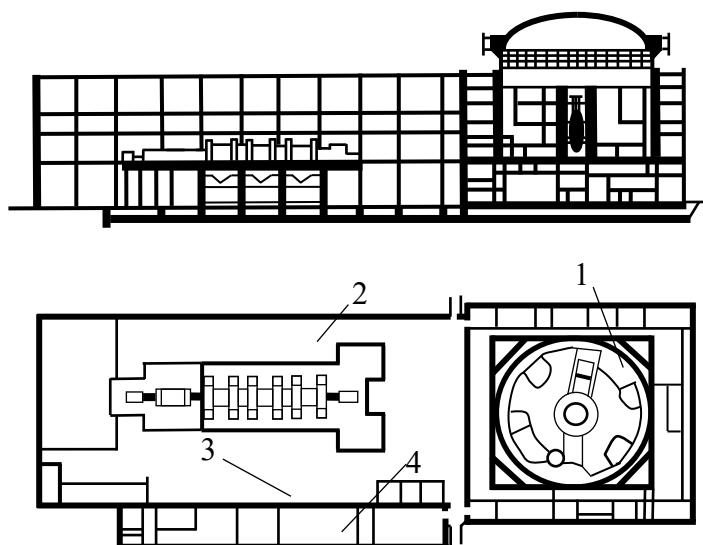


Рисунок 1. Водно-водяний енергетичний реактор: 1 – контаймент; 2 – турбінне відділення; 3 – діаграторне відділення; 4 – етажерка електротехнічних приладів

Дослідження температурного режиму пожежі є актуальним питанням, так як вертикальні кабельні тунелі відрізняються геометричною конфігурацією, видом кабелів, що прокладені у них, пожежним навантаженням та аеродинамічними характеристиками. Це може привести до того, що температурний режим пожежі у таких тунелях може відрізнитись як від стандартного температурного режиму пожежі, так і між собою. Відомим прикладом відмінності від стандартного є дослідження TNO [4] з отриманою температурною пожежною кривою RWS (рис. 2).

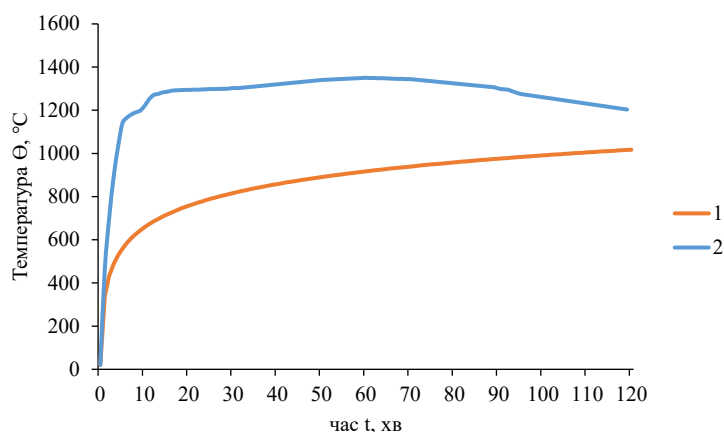


Рисунок 2. Температурні режими пожеж: 1 – стандартний температурний режим пожежі; 2 – температурна пожежна крива RWS [4]

Стандартний температурний режим пожежі (рис. 2) визначається відповідно до ДСТУ Б В.1.1-4 у вигляді залежності температури середовища від часу (1):

$$\theta_g = T_0 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1), \quad (1)$$

де t – час, хв.; T_0 – початкова температура середовища, °С.

З огляду на конструктивну унікальність, масивність та вартість, вогневі випробування таких огорожуючих конструкцій вертикального кабельного тунелю із відтворенням всіх впливів є неефективним, оскільки вони передбачають виготовлення по два зразки конструкцій із дотриманням всіх технологій. Зразки досліджуваних елементів є негабаритними і не можуть бути випробувані на обладнанні що наявне у випробувальних центрах України. Це означає, що розрахункова оцінка вогнестійкості даної структури є єдиним ефективним підходом щодо вирішення поставленої задачі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [4] були представлені результати досліджень, що стосувалися температурного впливу пожежі у тунелі Рунехамп в Норвегії. Зазначено, що дослідження TNO підтвердили попередні результати, отримані в 1979 році в Нідерландах. З робіт розділу VII.3 «Вогнева реакція матеріалів» звіту 1999 р. 05.05.Б «Контроль вогню та диму в тунелях» обговорює характеристики скельних тунельних облицювань порівняно із залізобетонними. Інтенсивність тепла, що виділяється під час великої пожежі, може призвести до того, що огорожуюча конструкція тунелю втратить свою несучу функцію. Але порівнявши температурно-часові залежності пожеж (рис. 2), виникають об'єктивні труднощі, пов'язані з визначенням вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій кабельних тунелів атомних електричних станцій. Оскільки основним методом визначення вогнестійкості будівельних конструкцій є метод випробувань за стандартним температурним режимом пожежі (1). У роботах [5, 6] вирішувалися питання стосовно динаміки розвитку пожеж у кабельних спорудах та динаміки температури в зоні горіння з та без подачі інертних газів. Ці дослідження важливі для розуміння процесів пожежі. У роботі [7] встановлено, що ширина тунелю мало впливає на швидкість вигорання пожежного навантаження, і вимірювалися розподіли температури в тунелях з різними умовами вентиляції. Це є важливі відомості для проектування тунелів. В роботі [8] за допомогою чисельного моделювання проаналізовано причини пожеж у тунелях. Робота [9] присвячена аналізу параметрів швидкості вигорання полівінілхлоридної ізоляції та лінійної швидкості поширення пожежі при різному виді укладки кабелів. Ці дослідження є важливими для визначення пожежної безпеки матеріалів та конструкцій. Робота [9] присвячена аналізу параметрів швидкості вигорання полівінілхлоридної ізоляції та лінійної швидкості поширення пожежі при різному виді укладки кабелів. Розглянута лінійна швидкість поширення пожежі при різному виді укладки кабелів. Ці дослідження є важливими для визначення пожежної безпеки матеріалів та конструкцій. Незважаючи на практичну значущість таких результатів, не розглянуто в достатній мірі методи укладки кабелів у тунелях прямокутного перерізу. Експериментальні дослідження часто проводять у зменшених масштабах модельних тунелів, які були виготовлені з вогнетривкого скла [10] або оцинкованої сталі [11]. Горіння електричних кабелів супроводжується виділенням значної кількості тепла, яке визначається питомою теплотою згорання матеріалів ізоляції, захисних оболонок кабелів і масою цих матеріалів, що містяться в одиниці довжини кабелю, а також залежить від геометричних, технічних та аеродинамічних параметрів.

Варіантом подолання відповідних труднощів може бути проведення повного факторного обчислювального експерименту щодо визначення температурного режиму пожежі на повномасштабних моделях, побудованих за допомогою програмного комплексу Fire Dynamics Simulator [12]. Дані моделі були верифіковані та перевірені на адекватність до проведеного натурального вогневого випробування на повномасштабній побудованій моделі у вертикальних кабельних тунелях атомних електричних станцій. Саме такий підхід використаний в роботі [13], автори підтверджують ефективність використання математичних моделей динаміки пожежі приміщень за допомогою програмного комплексу Fire Dynamics Simulator [12]. Однак на даний час є питання відповідності вогнестійкості випробовуваних конструкцій вертикальних кабельних тунелів із відмінними характеристиками до стандартного температурного режиму

пожежі (1) від геометричних, аеродинамічних параметрів та пожежного навантаження. Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого визначенню температурного режиму при пожежі у вертикальних кабельних тунелях атомних електростанцій.

Формулювання цілей досліджень. Метою роботи є проведення повного факторного обчислювального експерименту щодо визначення температурного режиму пожежі у вертикальних кабельних тунелях атомної електричної станції.

Провівши літературний огляд [14], стало можливим зробити висновок про конструктивні особливості вертикальних кабельних тунелів атомних електричних станцій. У переважній більшості випадків на виробництвах, у промисловості та для прокладки кабелів загального призначення використовуються типові конструкції вертикальних кабельних тунелів. Висота секції вертикального тунелю складає 5 м, може змінюватись залежно від загального об'єму ізоляційних матеріалів на 1 метр кабелю. Довжина та ширина вертикального тунелю складає по 2 м, може змінюватись залежно від кількості прокладених ліній. Також від їхньої кількості і матеріалу ізоляції проводів залежить пожежне навантаження тунелю, яке залежить від загального об'єму ізоляційних матеріалів у 1 метрі кабелю в середньому складає 5 кг. Аеродинамічні показники у більшості випадків схожі. У середині вертикального кабельного тунелю відбувається незначний рух повітря зі швидкістю близько 0,3 м/с. Повітря, що надходить з отворів вентиляційно-оглядових проходів та встановленої природної вентиляції достатньо для підтримання горіння. Площа проходів у 70 % випадків стандартна і складає 2,5 м².

Дослідження температурного режиму пожежі вертикальних кабельних тунелів було поділено на чотири поставлених завдання:

1. Визначення параметрів вертикального кабельного тунелю атомної електричної станції від яких залежить температурний режим та рамки їх варіацій;
2. Визначення та планування повного факторного експерименту з варіацією найбільш значимих параметрів;
3. Проведення обчислювальних експериментів та визначення залежностей температурних режимів пожежі у вертикальних кабельних тунелях від значимих параметрів.

Теоретичні дослідження були проведені на основі систем диференціальних рівнянь неперервних середовищ, таких як рівняння Нав'є-Стокса для опису руху рідини. Рівняння теплопровідності для передачі тепла, а також рівняння напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій в умовах нагріву під час пожежі. У наших дослідженнях ми також використовували рівняння Фур'є для моделювання теплового режиму вертикальних кабельних тунелів атомних електричних станцій. Для чисельного аналізу цих рівнянь та математичного моделювання ми використовували різні методи, такі як метод кінцевих або граничних елементів, методи нев'язок, метод Гальоркіна, а також оптимізаційні методи. Це дозволило нам точно апроксимувати та аналізувати складні фізичні процеси, які відбувалися під час пожежі в вертикальних кабельних тунелях. Це дозволило нам створити умови, максимально наближені до реальних, і вивчити розвиток пожежі в різних умовах. Об'єктом досліджень були вертикальні кабельні тунелі, що використовуються на атомних електростанціях, основною метою було встановити температурний режим пожежі, який повністю висвітлює процес тепломасопереносу в залежності від різних геометричних, технічних та аеродинамічних параметрів та їх вплив на безпеку станцій. Основною гіпотезою дослідження було припущення про те, що температурний режим пожежі у вертикальних кабельних тунелях атомної електричної станції може бути адекватно описаним математичними моделями та чисельними методами.

У наших дослідженнях ми приймали певні спрощення, зокрема, у моделях теплопровідності та напружено-деформованого стану, які були необхідні для чисельного розв'язку задачі в реальному часі. Однак ці спрощення були обґрунтовані й

дозволили отримати достатньо точні результати для наших цілей. Таким чином, наші дослідження були спрямовані на розуміння та моделювання теплових процесів у вертикальних кабельних тунелях атомної електростанції під час пожежі, використовуючи різні методи та експериментальні дані.

Виклад основного матеріалу дослідження. Як критерії температурного режиму пожежі обрано максимальна температура, що досягається всередині вертикального кабельного тунелю і час горіння. Для проведення обчислювального експерименту створюється математична модель вертикального кабельного тунелю в програмному комплексі Fire Dynamics Simulator. Використовується наступна послідовність розрахункових процедур:

1. За допомогою програмного комплексу створюється геометрична конфігурація вертикального кабельного тунелю необхідних розмірів. Всередині створюються моделі кабелів, сталевих кутків, отвору для виходу продуктів горіння та місця підпору повітря. Геометрична модель імпортується в середовище розрахункового програмного забезпечення.

2. Вводяться початкові параметри моделювання, які неможливо змінити у процесі розрахунку: початкова температура середовища, підпір повітря з одного боку вертикального кабельного тунелю, необхідний час пожежі (90 хв.).

3. Ініціюється процес горіння у центрі секції вертикального кабельного тунелю безпосередньо на кабелях у найнижчій точці.

4. Після проведення розрахунку відбувається аналіз температурно-часових кривих пожежі у зоні безпосереднього горіння вертикального кабельного тунелю та температурного градієнту.

З метою контролю температурного режиму засобами програмного забезпечення було створено 10 місць її контролю (рис. 3).

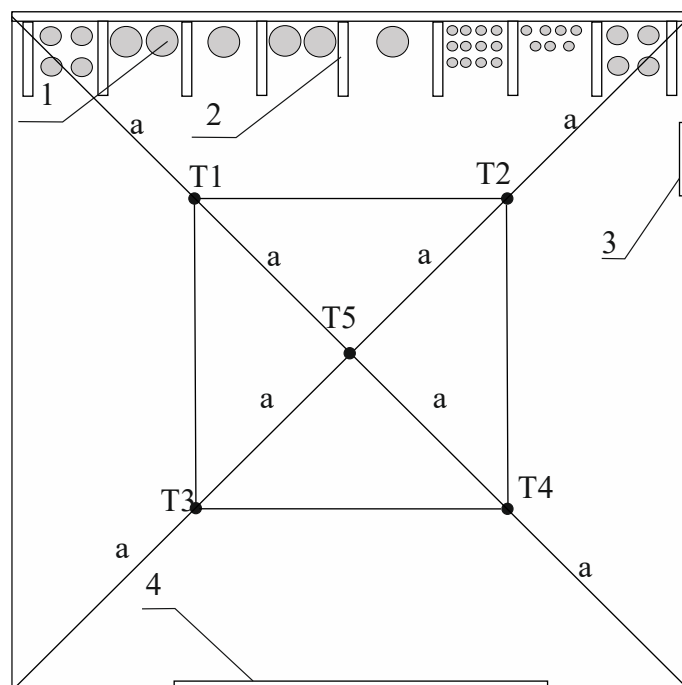


Рисунок 3. Схема розташування місць контролю температури у геометричному перерізі кабельного тунелю: 1 – кабелі, 2 – кронштейни, 3 – технологічний отвір виводу кабелів з секції, 4 – технологічний оглядовий прохід, T1 – T5 – місця контролю температури, а – параметр геометричного розміру в залежності від поздовжнього перерізу тунелю

Місця контролю температури створювались за наступним принципом:

1) у площині поперечного перерізу зони запалення 1 місце контролю в геометричному центрі та ще 4 місця у геометричних центрах утворених чвертин (рис. 3).

2) створено 2 площини, по 5 місць контролю у кожній на відстані h м від осередку пожежі. Загальна схема розташування площини (рис. 4).

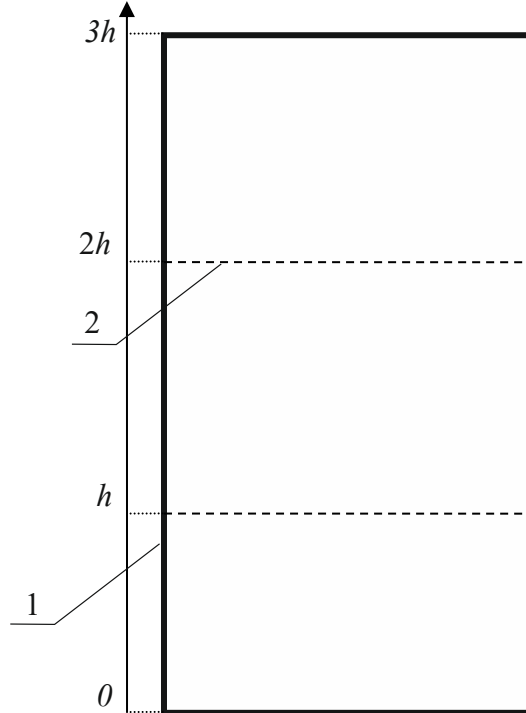


Рисунок 4. Схема розташування площини у яких розміщувались місця контролю температури по висоті вертикального кабельного тунелю: 1 – площина у якій розміщено 5 місць контролю температури способом показаним на рис. 4, 2 – огороження вертикального кабельного тунелю

Відповідно до розрахункової схеми математичної моделі вертикального кабельного тунелю (рис. 3, рис. 4) з метою проведення повноцінного аналізу параметрів, що впливають на температурний режим пожежі варіювались наступні параметри:

1. Пожежне навантаження:

- загальний об'єм неметалевих матеріалів у одному метрі кабелю від 1 до 10 кг;
- змінювався матеріал ізоляції кабелів та жил проводів. За рахунок цього змінювалась швидкість випуску теплової енергії з 1 м^2 кабельних ліній.

2. Геометричні параметри кабельного тунелю:

- варіювалась, як площа поздовжнього перерізу, за допомогою комбінації параметрів X та Y , так і за висотою Z , загальний параметр – площа поздовжнього перерізу вертикального кабельного тунелю;

- змінювалась площа S вентиляційно-оглядового проходу від 3,75 до $1,26 \text{ м}^2$.

3. Аеродинамічні параметри:

- задавалась горизонтальна складова швидкості руху повітря, як параметр, що характеризує надлишок або недостачу окисника та впливає на інтенсивність розвитку і поширення пожежі.

Схема секції з геометричними параметрами, що змінювались показано на рис. 5.

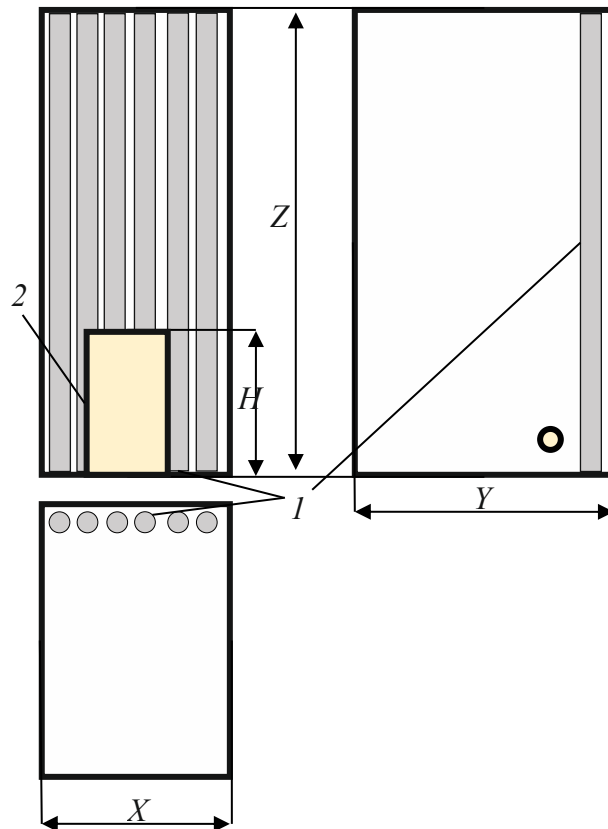


Рисунок 5. Схема вертикального кабельного тунелю з геометричними параметрами, що змінювались: 1 – модель кабельних ліній; 2 – модель вентиляційно-оглядових проходів площею $S \text{ м}^2$; X, Y, Z, H – геометричні параметри

Наступний етап полягав у створенні сіткової моделі вертикального кабельного тунелю. Чисельне інтегрування рівнянь за просторовими координатами проводили із використанням прямокутної, адаптивної, локально подрібненої сітки. Такий підхід уможлиблює, з одного боку, використання простої рівномірної неадаптивної сітки під час виконання завдань із порівняно нескладною геометрією. З іншого боку, з'являється змога в процесі розв'язування задач зі складною геометрією проводити адаптацію підлаштування сітки до особливостей геометрії поблизу граничних умов, а в ході розв'язування задач із розривними течіями – адаптацію за значеннями аналізованих функцій, їхніх градієнтів та ін. Враховувались умови конвекційного та радіаційного теплообміну під час експерименту із загальними величинами (табл. 1).

Таблиця 1 – Загальні величини умов конвекційного та радіаційного теплообміну.

1.	Стала Стефана – Больцмана	Вт/(м ² ·К ⁴)	$5,67 \cdot 10^{-8}$
2.	Константа Смагоринського	-	0.20
4.	Температура навколишнього середовища	°С	+15.00
5.	Тиск навколишнього середовища	Па	$1.01325 \cdot 10^5$
6.	Масова частка кисню в атмосфері	кг/кг	0.232378
7.	Масова частка чадного газу в атмосфері	кг/кг	$5.95 \cdot 10^4$
8.	Відносна вологість повітря	%	48.00
9.	Рівень розрахункової поверхні	м	12.50

Для врахування особливості, що полягає в неоднорідності матеріалу з якого виготовлені кабельні лінії, а також умов теплообміну (теплопровідності в твердому

матеріалі), кабельні лінії задано, як багатокомпонентний матеріал. Поєднано матеріал ізоляції проводів та алюміній з якої виготовляються кабелі. Крім того, враховано, що матеріал ізоляції вигорає. Вказаний параметр заданий через насипну густину та лінійну швидкість вигорання. Теплофізичні характеристики матеріалів й умови конвекційного та радіаційного теплообміну відображені у табл. 2.

Таблиця 2. Теплофізичні характеристики матеріалів й умови конвекційного та радіаційного теплообміну.

№ з/п	Найменування	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°С)	Питома теплоємність, кВт/м ²	Густина, кг/м ³	Степінь чорноти	Коефіцієнт випромінювання	Температура займання, °С
1.	Матеріал ізоляції полівінілхлорид	0.14	400.00	1380.00	0.85	0.95	410.00
2.	Матеріал ізоляції поліхлорид	0.16	300.00	910.00	0.80	0.92	340.00
3.	Матеріал ізоляції крос-пов'язаний поліетилен	0.35	300.00	960.00	0.80	0.87	390.00
4.	Матеріал ізоляції силікон	0.15	150.00	1150.00	0.85	0.95	400.00
5.	Матеріал ізоляції резина	0.10	800.00	1300.00	0.90	0.98	370.00
6.	Матеріал ізоляції кабелів маслонаповнені з резиною	0.38	800.00	1400.00	0.90	0.97	310.00

Для визначення значимості конкретного параметру спочатку було проведено математичне моделювання пожежі при середніх параметрах, а потім певний параметр збільшувався і зменшувався до крайніх значень (табл. 3).

Таблиця 3. Параметри вертикального кабельного тунелю від яких залежить температурний режим пожежі та рамки їх варіацій.

Матеріал ізоляції	Висота	Площа перерізу		Загальний об'єм матеріалів у 1 метрі кабелю	Площа вентиляційно-оглядового проходу	Рух повітря
	Z, м	Y, м	X, м	V, кг	S, м ²	V, м/с
полівінілхлорид, поліхлорид, крос-пов'язаний поліетилен, гума, силікон, маслонаповнені	2–10	1,0–3,0	1,0–3,0	1–10	1,26–3,75	0,1–0,6

З метою визначення найбільш значимих параметрів вертикального кабельного тунелю від яких залежить температурний режим пожежі та рамки їх варіацій було проведено сімнадцять обчислювальних експериментів для того, щоб визначити наскільки певний параметр (геометричні розміри, пожежне навантаження, вид матеріалу ізоляції і таке інше) впливає на температурний режим пожежі у вертикальному кабельному тунелі (рис. 6).

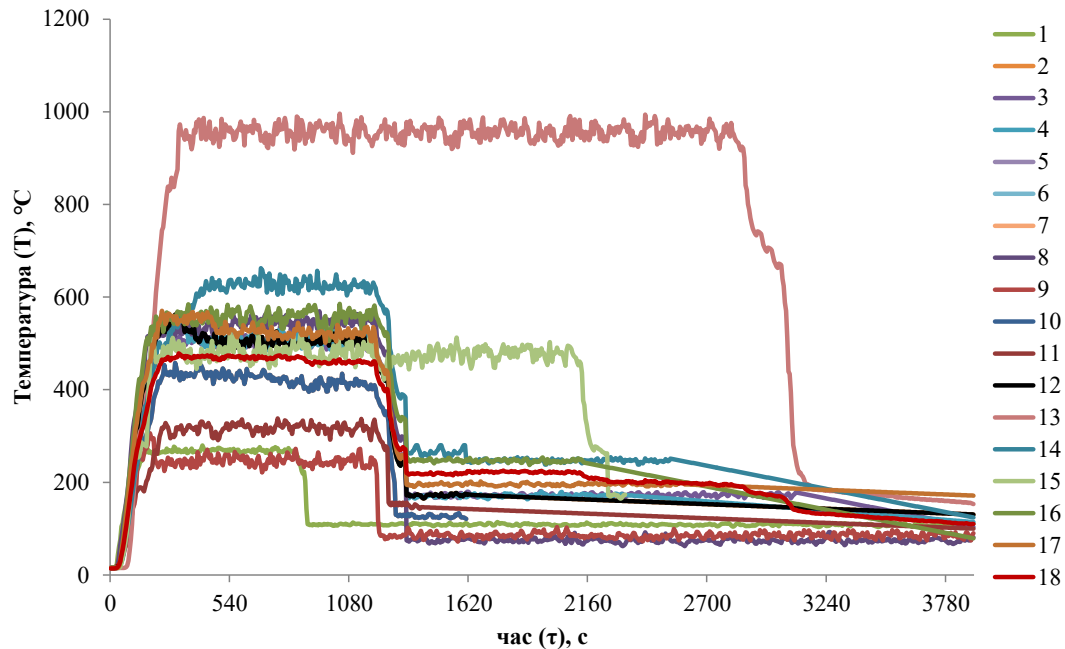


Рисунок 6. Усереднені температурні режими пожежі у математичній моделі вертикального кабельного тунелю атомної електростанції з параметрами (табл. 3): 1 – пожежне навантаження: мінімального об'єму неметалевих матеріалів у 1-му метрі кабелю; 2 – пожежне навантаження: матеріал ізоляції кабелів – полівінілхлорид; 3 – пожежне навантаження: матеріал ізоляції кабелів – поліхлорид; 4 – пожежне навантаження: матеріал ізоляції кабелів – крос-пов'язаний поліетилен; 5 – пожежне навантаження: матеріал ізоляції кабелів – гума; 6 – пожежне навантаження: матеріал ізоляції кабелів – силікон; 7 – пожежне навантаження: матеріал ізоляції кабелів – масло-наповнені; 8 – геометричні розміри: мінімальний розмір площі поздовжнього перерізу; 9 – геометричні розміри: висота; 10 – геометричні розміри: мінімальна площа вентиляційно-оглядового проходу; 11 – приток повітря: мінімальний приток повітря; 12 – базовий експеримент; 13 – пожежне навантаження: максимального об'єму неметалевих матеріалів у одному метрі кабелю; 14 – геометричні розміри: максимальний розмір площі поздовжнього перерізу; 15 – геометричні розміри: максимальна висота; 16 – геометричні розміри: максимальна площа вентиляційно-оглядового проходу; 17 – повітря: максимальний приток повітря; 18 – середня температура між графіками 1–17

Отримавши, 2 нові вибірки та порівнявши їх з першою розраховувалось відносно відхилення температурно-часових кривих режиму пожежі у вертикальному кабельному тунелі атомної електричної станції (рис. 6). Площа поздовжнього перерізу вертикального кабельного тунелю атомної електростанції впливає на швидкість зростання температури. Досягнення максимуму температури спостерігалось на 2–8 хвилинах у різних математичних моделях. При меншій висоті, пожежне навантаження вигорало швидше і зниження температури спостерігалось на 18 хвилині експерименту,

а при найбільшій модельованій висоті на 36 хвилині. Відповідно до отриманих даних експерименту (рис. 6) та порівнявши з температурно-часовими залежностями температури (рис. 2), можна констатувати, що найвища температура в осередку пожежі досягає значень температури від 1200 до 1400 °С.

Відповідно до результатів обчислювальних експериментів, найбільш суттєвий вплив на максимальну температуру, час її досягнення та час який вона зберігається мають 3 фактори: пожежне навантаження вертикального кабельного тунелю, висота та площа поздовжнього перерізу. У табл. 4 вказані інтервали параметрів в експерименті, які обрані в якості факторів.

Таблиця 4. Інтервали вирівнювання факторів в обчислювальному експерименті

Фактор 1. Пожежне навантаження у перерахунку на 1 м висоти, кг (Далі – x_1)	Фактор 2. Площа поздовжнього перерізу вертикального кабельного тунелю, м ² (Далі – x_2)	Фактор 3. Висота вертикального кабельного тунелю, м (Далі – x_3)
1 - 10	1,0-9,0	2-10

Обрана математична модель являє собою лінійну залежність максимальної температури всередині вертикального кабельного тунелю від обраних факторів, що має вигляд (2):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3, \quad (2)$$

де: $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$ – коефіцієнти регресії.

Для побудови регресії за формулою (2) необхідно провести 8 чисельних експериментів згідно з прийнятою матриці планування (табл. 5).

Таблиця 5. Типова матриця планування повного факторного експерименту визначення температурного режиму пожежі у вертикальному кабельному тунелі

№	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1.	+	+	+	+	+	+	+
2.	+	+	-	+	-	-	-
3.	+	-	+	-	+	-	-
4.	-	+	+	-	-	+	-
5.	+	-	-	-	-	-	-
6.	-	+	-	-	-	-	-
7.	-	-	+	-	-	-	-
8.	-	-	-	-	-	-	-

Для визначення вихідних даних повного факторного експерименту було проведено розрахунки 8 комп'ютерних моделей у які було закладено параметри варіантів максимуму і мінімуму інтервалів у різних комбінаціях. На рис. 7 показані результати експериментів.

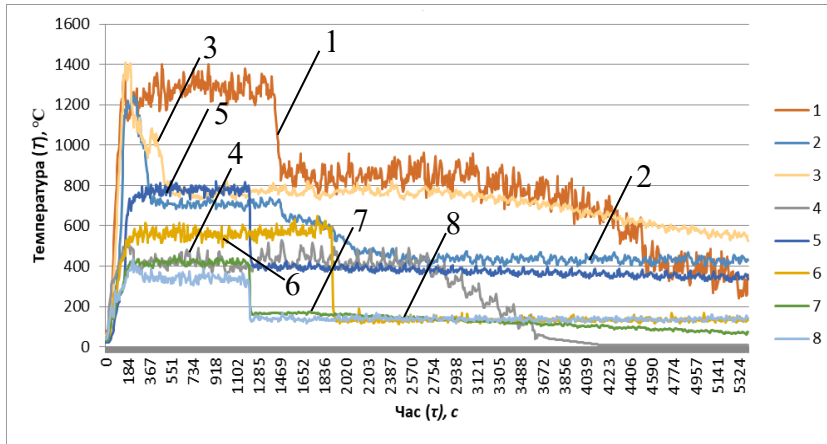
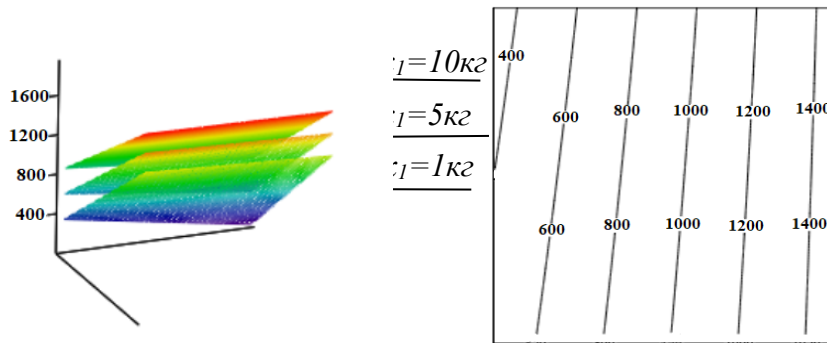


Рисунок 7. Зведений графік розрахунку 8 комп'ютерних моделей, дані яких є вхідними для повного факторного експерименту: 1–8 – номер експерименту відповідно до (табл. 5)

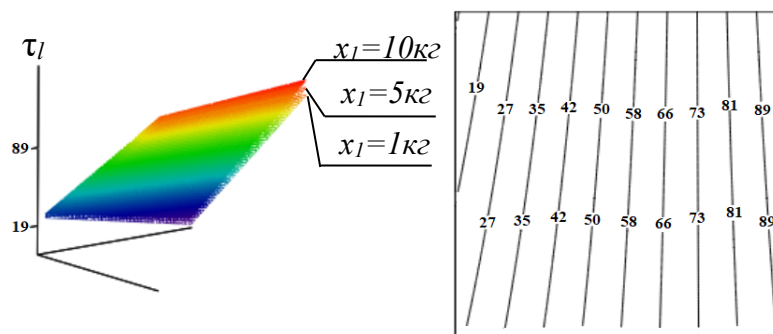
Далі представлено результати повного факторного експерименту визначення температурного режиму пожежі у секції (рис. 8 – 10).



а)

б)

Рисунок 8. Максимальна температура всередині вертикального кабельного тунелю під час пожежі (T_{max}): а – у вигляді графіків; б – у вигляді номограм



а)

б)

Рисунок 9. Тривалість пожежі у певній зоні вертикального кабельного тунелю (τ_l): а – у вигляді графіків; б – у вигляді номограм

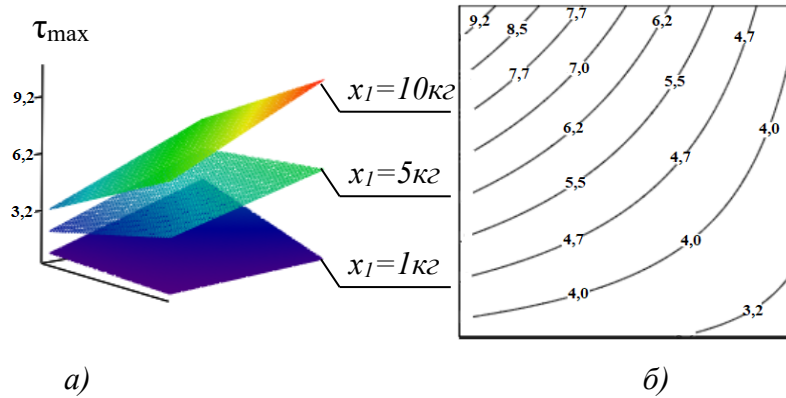


Рисунок 10. Час досягнення максимальної температури всередині вертикального кабельного тунелю під час пожежі (τ_{max}): а – у вигляді графіків; б – у вигляді номограм

За результатами повного факторного експерименту отримано регресі максимальної температури всередині вертикального кабельного тунелю під час пожежі (T_{max}), тривалості пожежі у певній локальній зоні (τ_l) та часу досягнення максимальної температури всередині вертикального кабельного тунелю під час пожежі (τ_{max}), що представлені виразами (3) – (5):

$$T_{max} = 25.58 \cdot x_1 + 34.12 \cdot x_2 + 0.25 \cdot x_3 + 3.12 \cdot x_1 \cdot x_2 + 8.11 \cdot x_1 \cdot x_3 - 3.11 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.37 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 360 \quad (3)$$

$$\tau_l = 1.6 \cdot x_1 + 1.1 \cdot x_2 - 0.5 \cdot x_3 - 0.12 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0.45 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0.22 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.003 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 16 \quad (4)$$

$$\tau_{max} = 0.77 \cdot x_1 + 0.15 \cdot x_2 + 0.08 \cdot x_3 - 0.091 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.082 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0.024 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0.015 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 3.1 \quad (5)$$

Виразами (3)-(5) лаконічно описано температурний режим пожежі у вертикальних кабельних тунелях з різними розмірами, аеродинамічними показниками та пожежним навантаженням, а також залежність температурного режиму пожежі від зазначених параметрів.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку у даному напрямку.

1. Визначено параметри вертикального кабельного тунелю атомної електричної станції від яких залежить температурний режим та рамки їх варіацій, а саме: висота секції вертикального тунелю може змінюватись залежно від загального об'єму ізоляційних матеріалів на 1 метр кабелю. Довжина та ширина вертикального тунелю може змінюватись залежно від кількості прокладених ліній. Також від їхньої кількості і матеріалу ізоляції проводів залежить пожежне навантаження тунелю, яке залежить від загального об'єму ізоляційних матеріалів у 1 метрі кабелю. Аеродинамічні показники у більшості випадків схожі. У середині вертикального кабельного тунелю відбувається незначний рух повітря. Повітря, що надходить з отворів вентиляційно-оглядових проходів та встановленої природної вентиляції достатньо для підтримання горіння;

2. Визначено найбільші значимі параметри та встановлено три незалежні фактори – площа поперечного перерізу вертикального кабельного тунелю, висота вертикального кабельного тунелю та пожежне навантаження;

3. Розроблено та проведено повний факторний експеримент. За його результатами отримано регресі максимальної температури всередині вертикального кабельного тунелю під час пожежі, тривалості пожежі у певній локальній зоні та часу досягнення максимальної температури всередині секції під час пожежі, що представлені виразами (3) – (5). При навантаженні в 10 кг ізоляції кабелів на 1 метр

висоти кабелю в прокладених кабельних лініях із полівінілхлориду, максимальна температура перевищувала 1200 °С та досягала значень в 1400 °С, при найменшому значенні в 1 кг на один метр висоти кабелю – 400 °С. Дана температура досягала максимальних значень на 48% швидше, ніж при максимальному навантаженні. При найменшій, площі поперечного перерізу та зменшенні висоти вертикального кабельного тунелю температура всередині зменшувалась на 50% від максимально можливого варіанту (рис. 7), час досягнення максимальних значень температури збільшувалась на 65%.

Отримані результати визначають важливі фактори, що впливають на температурний режим пожежі в вертикальних кабельних тунелях, зокрема пожежне навантаження, висоту тунелю та площу поздовжнього перерізу (табл. 4). Відповідно до результатів проведених обчислювальних експериментів (рис. 6), пожежне навантаження прямо пропорційно впливає на максимальну температуру, що створюється при пожежі у вертикальному кабельному тунелі. Температурний режим пожежі (рис. 7) у вертикальному кабельному тунелі з максимальним модельованим пожежним навантаженням у перші 8 хвилин збігається з температурним режимом відображеним у роботі RWS [4] у межах похибки у 3 %. Потім зона горіння зміщується і спостерігається зниження температури у зв'язку із вигоранням кисню у внутрішньому просторі та пожежного навантаження. Проте, при меншому пожежному навантаженні максимальна температура у вертикальному кабельному тунелі була на 20–75 % нижчою.

Зазначено, що стандартний температурний режим пожежі (1) не відповідає реальним умовам і не може служити адекватним критерієм для випробування вогнестійкості будівельних конструкцій відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-4. Замість цього, запропоновано використовувати температурний режим представлений виразами (3) – (5), отриманий шляхом обчислювального експерименту.

Отримані результати дослідження процесу тепломасопереносу в вертикальних кабельних тунелях атомної електростанції мають практичну значущість для покращення безпеки станцій та розробки нових технологій у галузі безпеки. Запропоновані новації дадуть змогу забезпечити необхідну межу вогнестійкості огорожувальних конструкцій вертикальних кабельних тунелів підприємств Міністерства енергетики України. Подальшу роботу буде направлено на дослідження вогнестійкості будівельних конструкцій вертикальних кабельних тунелів при визначених у даній роботі температурних режимах пожежі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Серия норм МАГАТЭ по безопасности. Пожарная безопасность при эксплуатации атомных электростанций. № NS-G-2.1;
2. EN 1991-1-2:2010 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1–2: General actions - Actions on structures exposed to fire;
3. EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2004;
4. Chapter VII.4 "Fire resistance of structures" of technical report 1999 05.05.B "Fire and Smoke Control in Tunnels";
5. 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: УкрНДІЦЗ, 2013. – № 1 (27). – С. 38 – 44;
6. Ji J. et al. Influence of aspect ratio of tunnel on smoke temperature distribution under ceiling in near field of fire source // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Т. 106. – С. 1094-1102;

7. Tian X. et al. Full-scale tunnel fire experimental study of fire-induced smoke temperature profiles with methanol-gasoline blends //Applied Thermal Engineering. – 2017. – Т. 116. – С. 233-243;
8. Modic J. Fire simulation in road tunnels //Tunnelling and underground space technology. – 2003. – Т. 18. – №. 5. – С. 525-530;
9. Vaari J. et al. Numerical simulations on the performance of water based fire suppression systems //VTT Technol. – 2012. – Т. 54;
10. Sun J. et al. Experimental study of the effectiveness of a water system in blocking fire-induced smoke and heat in reduced-scale tunnel tests. Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. Т. 56. С. 34–44;
11. 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;
12. Forney G.P. User's Guide for Smokeview Version 5-A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data.: National Institute of Standards. – P. 234;
13. Трошкин 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: ЧИПБ, 2015 (20), С.104 –109;
14. Трошкін С.Е., Удовенко М.Ю. Пожежна безпека кабельних тунелів атомних електричних станцій. // Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців» – м. Харків: Видавничий центр НТУ «ХП», С.173 – 174.

REFERENCES

1. Seriya norm MAGATE po bezopasnosti. Pozharnaya bezopasnost pri ekspluatatsii atomnyih elektrostantsiy. # NS-G-2.1;
2. EN 1991-1-2:2010 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1–2: General actions - Actions on structures exposed to fire;
3. EN 1992-1-2:2005 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2004;
4. Chapter VII.4 "Fire resistance of structures" of technical report 1999 05.05.B "Fire and Smoke Control in Tunnels";
5. Kovalyshyn V.V. Perevirka na adekvatnist modeliuvannia protsesiv rozvytku i hasinnia pozhezh v kabelnykh tuneliakh (v obmezhenykh ob'ємakh) // Naukovyi visnyk Ukrainського naukovo-doslidnoho instytutu pozhezhnoi bezpeky. – Kyiv: UkrNDITsZ, 2013. – № 1 (27). – S. 38 – 44;
6. Ji J. et al. Influence of aspect ratio of tunnel on smoke temperature distribution under ceiling in near field of fire source //Applied Thermal Engineering. – 2016. – Т. 106. – С. 1094-1102;
7. Tian X. et al. Full-scale tunnel fire experimental study of fire-induced smoke temperature profiles with methanol-gasoline blends //Applied Thermal Engineering. – 2017. – Т. 116. – С. 233-243;
8. Modic J. Fire simulation in road tunnels //Tunnelling and underground space technology. – 2003. – Т. 18. – №. 5. – С. 525-530;
9. Vaari J. et al. Numerical simulations on the performance of water based fire suppression systems //VTT Technol. – 2012. – Т. 54;
10. Sun J. et al. Experimental study of the effectiveness of a water system in blocking fire-induced smoke and heat in reduced-scale tunnel tests. Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. Т. 56. С. 34–44;
11. 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;

12. Forney G.P. User's Guide for Smokeview Version 5-A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data.: National Institute of Standards. – P. 234;

13. Troshkin S.E., Sidney S.A., Tischenko E.A., Nekora O.V. Issledovanie adekvatnosti rezultatov matematicheskogo modelirovaniya dinamiki pozhara v pomeschenii s pomoschyu programmnoho kompleksa FDS // Pozharnaya bezopasnost: teoriya i praktika – Cherkassy: ChIPB, 2015 (20), S.104–109;

14. Troshkin S.E., Udovenko M.Iu. Pozhezhna bezpeka kabelnykh tuneliv atomnykh elektrychnykh stantsii. // Materialy XV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii mahistrantiv ta aspirantiv «Teoretychni ta praktychni doslidzhennia molodykh naukovtsiv» – m. Kharkiv: Vydavnychiy tsentr NTU «KhPI», S.173 – 174.

UDC 614.841.45

Serhii TROSHKIN,¹

Mykola SURIANINOV,² Doctor of technical sciences, professor,

Diana TROSHKINA,³

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

²*Odesa State Academy of Construction and Architecture, Odesa, Ukraine,*

³*GU DSES of Ukraine in Zaporizhzhia region*

CONDUCTING A FULL FACTORIAL COMPUTATIONAL EXPERIMENT TO DETERMINE THE FIRE TEMPERATURE REGIME IN A VERTICAL CABLE TUNNEL OF A NUCLEAR POWER PLANT

The research of the fire temperature regime is a relevant issue because vertical cable tunnels differ in geometric configuration, the types of cables they contain, fire loads, and aerodynamic characteristics. This can lead to variations in the fire temperature regime within such tunnels, both compared to the standard fire temperature regime and among themselves. To address these challenges, conducting a full factorial computational experiment to determine the fire temperature regime on full-scale models constructed using the Fire Dynamics Simulator software is a viable solution. These models have been verified and checked for adequacy compared to actual full-scale fire tests conducted on constructed models. In order to identify the most significant parameters of the vertical cable tunnel that influence the fire temperature regime and the range of their variations, seventeen computational experiments were conducted. According to the obtained results, the most influential factors affecting the maximum temperature, the time to reach it, and the duration it is maintained are three: fire load, height, and the longitudinal cross-sectional area.

A complete factorial experiment was developed and carried out to obtain a regression of the maximum temperature, fire duration, and time to reach the maximum temperature. With a cable insulation load of 10 kg per meter of cable height in cable lines made of polyvinyl chloride, the maximum temperature exceeded 1200°C and reached values of 1400°C, while with the lowest load at 1 kg per meter of cable height, it reached 400°C. This temperature reached its maximum values 48% faster than with the maximum load. With the smallest cross-sectional area and a reduced height of the vertical cable tunnel, the temperature inside decreased to 50% of the maximum possible variant, and the time to reach the maximum temperature increased by 65%. When further assessing the fire resistance of building structures, the obtained fire temperature regime should be chosen in accordance with the conducted full factorial experiment.

Key words: *fire, nuclear power plant, containment, vertical cable tunnel, fire temperature regime.*