

*О.М. Нуязін, к.т.н., доцент каф., ЧПБ ім. Г. Чорнобиля НУЦЗУ,
С.В. Поздєєв, д.т.н., проф., головн.н.с., ЧПБ ім. Г. Чорнобиля НУЦЗУ,
Т.В. Самченко, ад'юнкт, ЧПБ ім. Г. Чорнобиля НУЦЗУ,
М.А. Кришталь, к.психол.н., проф., ЧПБ ім. Г. Чорнобиля НУЦЗУ*

ДОСЛІДЖЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПРИ ПОЖЕЖІ У КАБЕЛЬНОМУ ТУНЕЛІ

Метою проведення досліджень є вивчення адекватності математичних моделей кабельних тунелів для подальшого їх використання при вивченні температурного режиму пожежі. Для досягнення поставленої мети на науково-дослідному полігоні УкрНДІЦЗ були проведені натурні випробування і отримані дані про динаміку зміни температури у кабельному тунелі з відомими геометричними параметрами та пожежним навантаженням. У одному з програмних комплексів CFD була створена математична модель кабельного тунелю, аналогічна до натурального. Проведено обчислювальний експеримент. Моделювання, як метод наукового дослідження дає можливість, не виконуючи матеріально затратних та трудомістких натурних експериментів на моделях проводити всі необхідні досліді щодо визначення температурних режимів пожежі у кабельних тунелях. Спираючись на результати обчислювального експерименту і натурних випробувань, були розраховані критерії адекватності. На основі проведеного аналізу досліджена адекватність використовуваних математичних моделей. У даній роботі дістало подальшого розвитку застосування обчислювальних експериментів для дослідження процесів тепломасообміну при пожежах у кабельних тунелях.

Ключові слова: кабельний тунель, температурний режим пожежі, критерії адекватності, натурний експеримент, обчислювальний експеримент.

Постановка проблеми. Проблема пожежної безпеки електричних кабелів існувала в минулому та продовжує існувати в сьогоденні. Значною мірою зростання числа пожеж в кабельних комунікаціях було обумовлене збільшенням кількості кабелів, які використовуються з метою харчування, контролю та управління електрообладнання на сучасних виробництвах, а також використанням при ґрунтових прокладках кабелів загальнопромислового виконання без додаткових заходів по їх вогнезахисту. Крім того, розвиток та вдосконалення телекомунікаційних мереж загального користування України здійснюється відповідно до Концепції розвитку телекомунікацій України із застосуванням новітніх технологій у сфері телекомунікацій, які відповідають міжнародним стандартам, з урахуванням технологічної цілісності всіх мереж та засобів телекомунікацій, підвищення ефективності та сталості функціонування. Під час проектування та будівництва кабельних мереж, зокрема кабельних тунелів, необхідно дотримуватись вимог будівельних норм і правил, щоб гарантувати відповідність меж вогнестійкості будівельних конструкцій кабельних тунелів при пожежі.

Кабельна продукція постійно розвивається і вдосконалюється. Для проведення випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій кабельних тунелів використовується стандартний температурний режим пожежі,

який може не відповідати режиму пожежі у реальному кабельному тунелі.

Дослідження температурного режиму пожежі є актуальним питанням, так як 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 відрізнятися як від стандартного так і між собою. У такому разі не можна гарантувати відповідність меж вогнестійкості випробовуваних конструкцій чинним нормативам. В цьому випадку може істотно знизиться безпеку людей і матеріальних цінностей під час пожеж у кабельних тунелях.

Для того щоб не проводити дорогі випробування по вивченню даного питання, існує можливість здійснити такі дослідження на основі результатів обчислювальних експериментів. Сучасне програмне забезпечення з моделювання теплових процесів засобами комп'ютерної газодинаміки (CFD), дозволяє врахувати всі необхідні параметри досліджуваних процесів і вивчити вплив геометричних і конструктивних характеристик печі для випробувань залізобетонних конструкцій на якість одержуваних даних.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Дослідженнями температурних режимів, зокрема у тунелях займалися і займаються багато науковців, зокрема Ройтман В. М. у своєму дослідженні [1] запропонував температурний режим пожежі режим пожежі в тунелях. У роботах [2–4] авторський колектив до складу якого входив Ковалишин В. В. досліджував динаміку розвитку пожеж у кабельних спорудах та описав динаміку температури в зоні горіння без подачі та з подачею інертних газів.

Роботи зарубіжних вчених були присвячені як математичному моделюванню, так і реальним експериментам [5–8]. У роботі [5] встановлено, що ширина тунелю мало впливає на швидкість вигорання пожежного навантаження. Робота [6] описує групу повномасштабних експериментів. Вимірювались розподіли температури в тунелях з різними умовами вентиляції. У чисельному моделюванні [7] проаналізовано причини пожеж у тунелях. Робота [8] присвячена аналізу параметрів швидкості вигорання ізоляції ПВХ-кабелю. Було розглянуто лінійна швидкість поширення пожежі при різному виді укладки кабелів. Незважаючи на практичну значущість таких результатів, відсутні дані про верифікацію математичних моделей пожеж у кабельних тунелях на основі експериментальних даних.

У попередній роботі [9] було обґрунтовано методику проведення експерименту з моделювання пожежі у кабельному тунелі, що була розроблена на основі нормативних документів. Описано процес проведення та представлено результати експерименту з визначення температурного режиму пожежі у кабельному тунелі згідно розробленої методики. Отримані дані є основою для верифікації комп'ютерних моделей пожеж у кабельних тунелях та визначення температурного режиму пожежі для випробування на вогнестійкість будівельних конструкцій кабельних тунелів.

Відповідно до проведених раніше досліджень [1–9], різноманітність конструктивних особливостей кабельних тунелів, їхнього пожежного навантаження, притоку та відтоку газів та інших параметрів зумовлює суттєві відмінності температурних режимів пожежі. Зокрема, сучасна ізоляція кабельної продукції може відрізнятися за пожежно-

технічними характеристиками від вивченої вченими [1].

У даній роботі досліджується адекватність математичних моделей тепломасопереносу при пожежі у кабельному тунелі для подальшого їх використання при вивченні впливу пожежного навантаження та конструктивних характеристик кабельних тунелів на температурний режим пожежі. Для досягнення поставленої мети на полігоні УкрНДІЦЗ проведені натурні випробування [9] і проведено аналітичний розрахунок у аналогічній конфігурації тунелю з відповідним пожежним навантаженням.

Постановка завдання та його вирішення. Метою роботи є перевірка адекватності CFD-моделей пожеж у кабельних тунелях створених у програмному комплексі Fire Dynamics Simulator 6.2 на основі експериментальних даних для їх подальшого використання при вивченні впливу пожежного навантаження та конструктивних характеристик кабельних тунелів на температурний режим пожежі.

Для досягнення мети поставлено до розв'язання наступні задачі:

1. Розрахувати критерії адекватності математичних моделей пожеж у кабельних тунелях створених у програмному комплексі Fire Dynamics Simulator 6.2 на основі експериментальних даних (t-критерій Стюдента, Q-критерій Кохрена, F-критерій Фішера).

2. Розрахувати відносну похибку результатів математичного моделювання від експериментальних даних.

3. Зробити висновок про ефективність моделювання теплових процесів для проведення подальших досліджень температурних режимів пожежі у кабельних тунелях.

На випробувальному полігоні УкрНДІЦЗ було проведено експериментальні дослідження за методикою описаною у [9]. Для кореляції результатів було проведено 2 експерименти. Тривалість кожного з них склала 30 хв. Схема розташування термопар у кабельному тунелі показано на рис. 1. Усереднені результати по кожній з 30 встановлених термопар показано на рис. 2.

Аналізуючи отримані графіки температури у кабельному тунелі, можна констатувати, що найвища температура спостерігається в зоні осередку пожежі біля кабелів. Вона знаходиться в межах 700-1000 °C в залежності від розташування місця контролю. Теплова енергія розповсюджується інтенсивніше в бік отвору виходу продуктів горіння. Температура знаходиться в межах 300-500 °C. У зоні між осередком пожежі та місцем підпору повітря температура знаходиться в межах 80-200 °C (рис. 2).

Для проведення обчислювального експерименту з використанням створеної математичної моделі кабельного тунелю для випробувань використана нижченаведена послідовність розрахункових процедур:

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

2. Вводяться початкові параметри моделювання, як неможливо змінити у процесі розрахунку: початкова температура середовища, підпір повітря з одного боку тунелю, необхідний час пожежі (30 хв.).

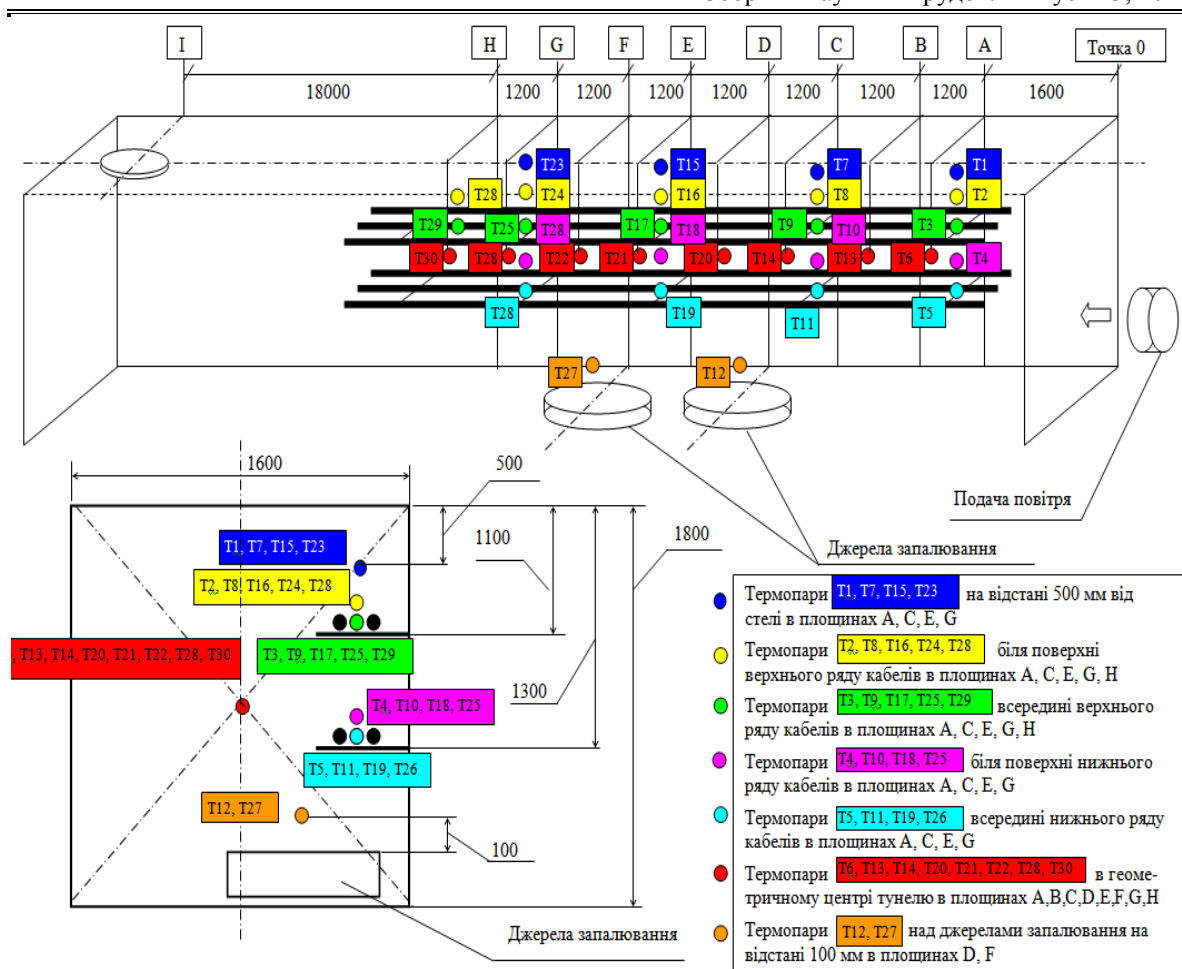


Рис. 1. Схема розташування термопар у кабельному тунелі. 1-ряд пучків кабелів до 796 кг – після 791 кг; 2- ряд пучків кабелів до 864 кг – після 861 кг

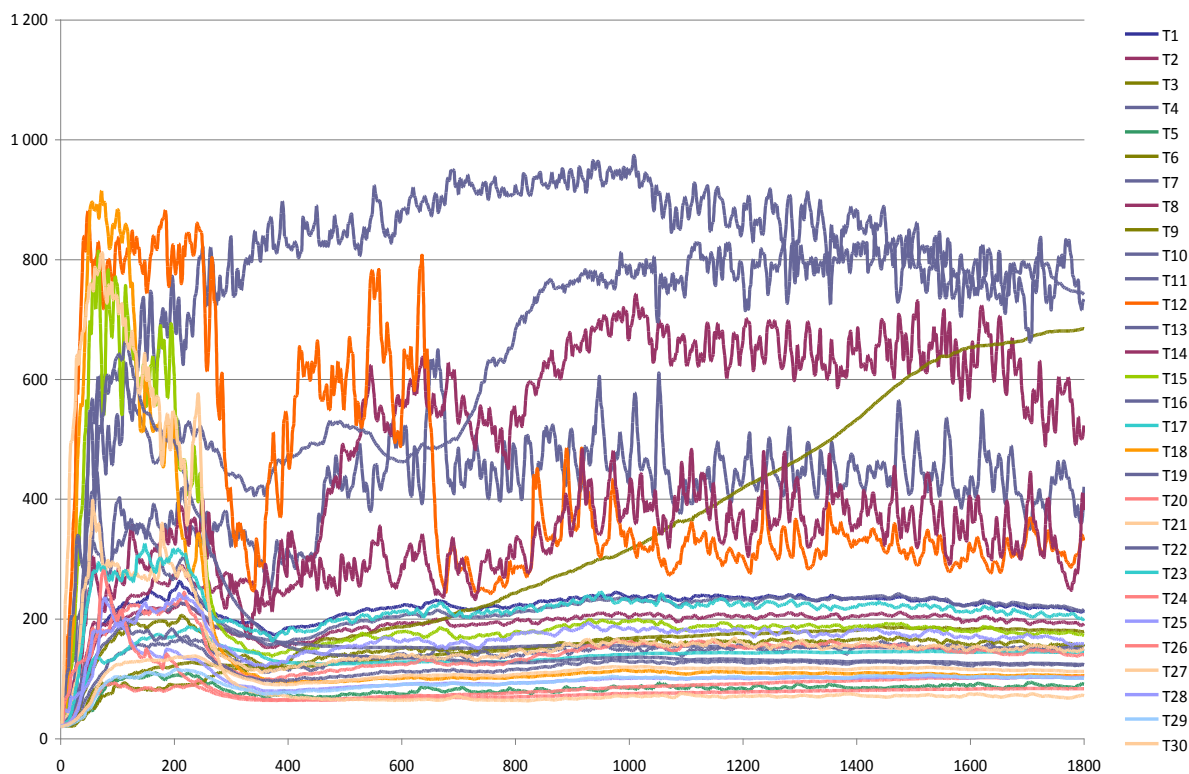


Рис. 2. Температурно-часова залежність у кабельному тунелі за результатами експериментальних досліджень по кожній з 30 встановлених термопар

3. Ініціюється процес горіння у середній частині тунелю безпосередньо під кабелями. З цією метою моделюється осередок пожежі розміром $0,6 \times 0,6$ м.

4. При проведенні розрахунку відбувається спостереження за температурою відповідних точок у тунелі та температурного градієнту в режимі он-лайн.

З метою контролю температурного режиму засобами комп'ютерного комплексу FDS було створено 30 місць її контролю, що відповідали місцям розміщення термопар під час натурного експерименту (рис. 1, рис. 4).

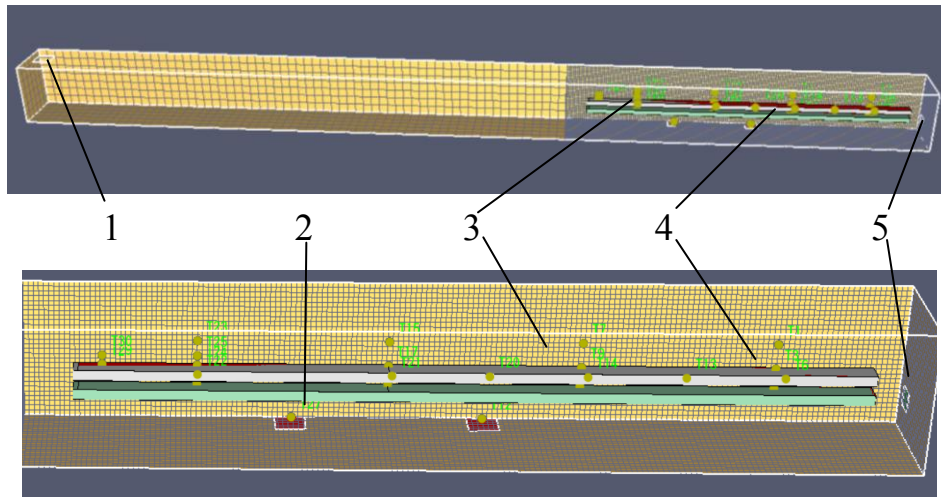


Рис. 3. Вигляд моделі кабельного тунелю, що використовувався для обчислювального експерименту: 1- отвір виходу продуктів горіння; 2 – осередок пожежі; 3 – металевий куток; 4 – кабелі; 5 – зона підпору повітря



Рис. 4. Схема розташування місць контролю температури у кабельному тунелі: T1 – T30 –місця контролю

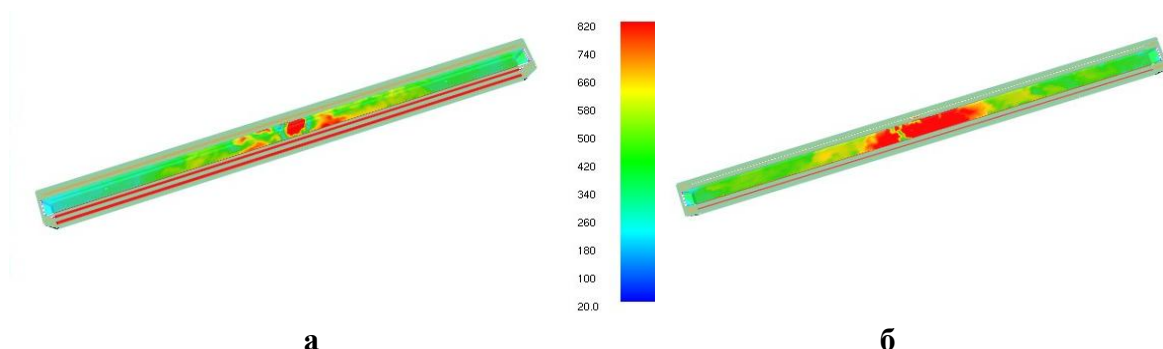


Рис. 5. Градієнт температур у просторі моделі кабельного тунелю: а – 5 хвилина, б – 30 хвилина

Для наочності процесів прогрівання простору кабельного тунелю під час обчислювального експерименту у комп'ютерні моделі були створені площини, на яких значення температури візуалізується за допомо-

гою кольорів («заливки температури»).

Враховуючи розподіл температур, що показано на рис. 5 кабельний тунель умовно можливо поділити на 3 зони: осередку пожежі, між осередком пожежі та отвором для виходу продуктів горіння, між осередком пожежі та місцем підпору повітря.

Після завершення обчислювального експерименту було отримано дані температур по кожному місцю контролю для проведення верифікації.

На рис. 6 побудовано графіки середньої температури в різних частинах кабельного тунелю під час обчислювального експерименту.

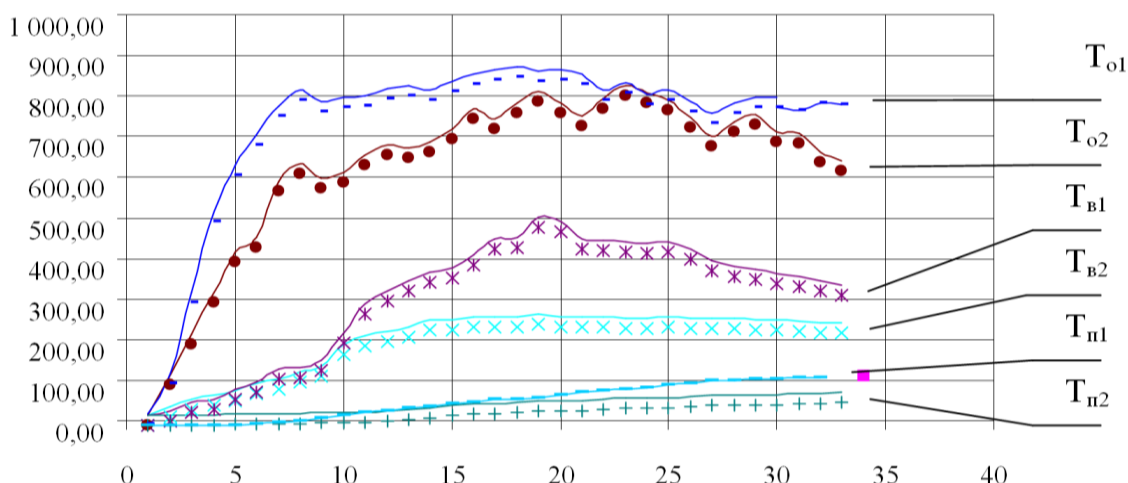


Рис. 6. Середня температура у 3-х зонах кабельного тунелю: T_{o1} – у верхній частині тунелю зони осередку пожежі; T_{o2} – у нижній частині тунелю зони осередку пожежі; T_{v1} – у верхній частині тунелю зони між осередком пожежі та отвором для виходу продуктів горіння; T_{v2} – у нижній частині тунелю зони між осередком пожежі та отвором для виходу продуктів горіння; T_{n1} – у верхній частині тунелю зони між осередком пожежі та місцем підпору повітря; T_{n2} – у нижній частині тунелю зони між осередком пожежі та місцем підпору повітря

Для перевірки адекватності результатів моделювання були використані такі критерії адекватності:

- F-критерій Фішера. За допомогою критерію Фішера можливо перевірити гіпотезу про рівність генеральних дисперсій, розкиду температур на кожній хвилині випробувань

$$F = \frac{S_{xy}^2}{S_y^2}, \quad (1)$$

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

Дисперсія адекватності розраховувалася, як відхилення між розрахунковими і експериментальними даними по кожній з термопар встановленої при проведенні натурного експерименту і відповідного їй місця виміру температури в математичній моделі.

У створеній моделі 30 місць виміру температури, під час експерименту термопар – 30. Дані кожної з термопар розрахунку порівнювалися по черзі з термопарами експерименту. Так отримано 30 значень дисперсії адекватності

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

де n – кількість замірів температури, y_i – значення критерію при моделюванні, x_i – значення критерію при випробуванні.

Дисперсія відтворюваності розраховувалася, як відхилення між результатами двох натурних експериментів, з урахуванням експериментальної похибки [10]

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{y}| + 15)^2, \quad (3)$$

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

Таким чином, ми по черзі 30 значень дисперсії адекватності, порівнюємо з дисперсією відтворюваності і розраховуємо критерій Фішера. Всі результати зведені в табл. 1.

- t -критерій Стюдента, застосовується для порівняння результатів реального і обчислювального експериментів:

$$t = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\sqrt{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (4)$$

$$\bar{y}_{1,2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (5)$$

де S_1^2 , S_2^2 – оцінки дисперсій натурального і обчислювального експерименту, розраховувалися аналогічно розрахунку критерію Фішера.

Таким чином, було отримано 30 значень критерію (табл. 1), при розрахунку дисперсії відтворюваності, як відхилення розрахункової температури простору безпосередньо біля змодельованої термопари і показань змодельованої термопари, з урахуванням експериментальної похибки [10].

Результати зведені в табл. 1.

- Q - критерій Кохрена (визначення викидів і квазівикидів)

$$Q = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^p S_i^2}, \quad (6)$$

де $S_{\max}$ – найбільше середньоквадратичне відхилення результатів випробувань. Q -критерій використовують при порівнянні трьох і більше вибірок однакового обсягу. Були порівняні дисперсії між двома натурними експериментами та обчислювальним в місці розміщення кожної термопари. Було отримано 30 значень критерію. Результати зведені в таб. 1.

Табл. 1. Параметри дисперсії результатів математичного моделювання процесу теплообміну при пожежі у кабельному тунелі від експериментальних даних

Зона термопар (рис. 2, рис. 4)	Максимальне відхилення, °C	Середнє відхилення, °C	Відносне відхилення, %	F-критерій	Критичне значення F-крит. [11]	t-критерій	Критичне значення t-крит. [11]	Q-критерій	Критичне значення Q-крит. [11]
T ₁	54,3	14,1	10,4	2,42	4,00	1,81	2,75	0,42	0,88
T ₂	52,1	10,3	9,9	2,27		1,68		0,32	
T ₃	45,5	17,8	9,8	2,08		1,80		0,43	
T ₄	45,6	17,9	11,6	2,43		1,93		0,50	
T ₅	20,2	6,1	7,3	1,84		1,23		0,24	
T ₆	39,7	19,0	11,5	2,53		2,14		0,53	
T ₇	49,4	17,2	11,7	2,77		1,95		0,44	
T ₈	46,3	14,9	9,8	2,17		1,69		0,37	
T ₉	50,2	13,1	8,1	1,98		1,21		0,23	
T ₁₀	59,5	20,2	10,1	2,06		1,78		0,38	
T ₁₁	51,1	21,0	10,0	2,04		1,78		0,37	
T ₁₂	81,9	19,7	6,8	1,44		1,01		0,14	
T ₁₃	45,8	18,4	7,9	1,42		1,20		0,19	
T ₁₄	74,1	25,9	7,3	1,45		1,18		0,17	
T ₁₅	131,2	50,3	6,4	1,42		1,18		0,17	
T ₁₆	139,7	48,1	6,4	1,35		1,17		0,17	
T ₁₇	132,8	48,0	6,5	1,41		1,14		0,15	
T ₁₈	109,2	46,4	5,7	1,32		1,15		0,15	
T ₁₉	122,5	57,8	7,9	1,48		1,19		0,20	
T ₂₀	92,9	45,4	8,2	1,54		1,21		0,23	
T ₂₁	91,0	36,1	6,7	1,50		1,17		0,19	
T ₂₂	98,8	36,8	7,0	1,56		1,18		0,21	
T ₂₃	82,3	36,0	8,6	1,69		1,24		0,23	
T ₂₄	72,1	32,8	6,6	1,47		1,20		0,21	
T ₂₅	75,4	43,7	8,7	1,66		1,23		0,21	
T ₂₆	70,6	40,2	8,4	1,62		1,22		0,22	
T ₂₇	100,7	61,4	7,0	1,58		1,24		0,20	
T ₂₈	28,9	15,6	8,6	1,69		1,11		0,13	
T ₂₉	24,9	13,9	13,5	3,45		2,53		0,66	
T ₃₀	28,0	10,2	8,8	1,70		1,09		0,13	
Сер. значення	70,6	28,61	8,58	1,78		1,84		0,27	

Аналізуючи порівняння дисперсії результатів математичного моделювання процесу теплообміну при пожежі у кабельному тунелі та експериментальних даних (табл. 1) можна констатувати, що жодне із значень критеріїв адекватності не перевищує допустимих значень, відносне відхилення складає 8,58 %, що показує ефективність моделювання теплових процесів для проведення подальших досліджень температурних режимів пожежі у кабельних тунелях.

Висновки. У даному дослідженні перевірено адекватність математичних моделей кабельних тунелів для подальшого їх використання при вивченні температурного режиму пожежі. програмного комплексу CFD Fire Dynamics Simulator 6.2 та доведено ефективність моделювання теплових процесів для проведення подальших досліджень температурних

режимів пожежі у кабельних тунелях. Створена математична модель кабельного тунелю, аналогічна до натурального експерименту, проведеного раніше [9]. Проведено обчислювальний експеримент. Спираючись на результати обчислювального експерименту і натурних випробувань, були розраховані критерії адекватності (t-критерій Стюдента, Q-критерій Кохрена, F-критерій Фішера). Жодне із значень критеріїв адекватності не перевищує допустимих значень. При критичних значеннях F-критерій Фішера – 4,00, t-критерію Стюдента – 2,75, Q-критерія Кохрена – 0,88 [11], їх середні значення склали: 1,78; 1,84 та 0,88 відповідно, а максимальне значення не перевищило критичне. Розраховано відносне відхилення результатів математичного моделювання від експериментальних даних, яке складає 8,58 %. Результати проведеного дослідження показують ефективність моделювання теплових процесів для проведення подальших досліджень температурних режимів пожежі у кабельних тунелях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / Владимир Миронович Ройтман. – М. : Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. – 382 с.
2. Обґрунтування та розрахунок параметрів гасіння пожеж інертними газами з наступною їх рециркуляцією в кабельних тунелях / В.В. Ковалишин, В.М. Ковальчик, С.І. Гончаренко // Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси: АПБ, 2014. – № 17. – С. 39 – 44.
3. Ковалишин В. В. Моделювання впливу парогазових потоків на пожежу в каналах великої довжини // Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки. – Київ: УкрНДІЦЗ, 2011. – № 1 (23). – С. 191 – 199.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Modic J. Fire simulation in road tunnels // Tunnelling and underground space technology. – 2003. – Т. 18. – №. 5. – С. 525-530.
8. Vaari J. et al. Numerical simulations on the performance of water-based fire suppression systems // VTT Technol. – 2012. – Т. 54.
9. Обґрунтування методики експериментального дослідження температурного режиму пожежі у кабельному тунелі / С.В. Поздєєв, Т.В. Самченко, О.М. Нуянзін // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека № 1 (5) 2018. – Київ : УкрНДІЦЗ, 2018.
10. Методи математичного моделювання теплових процесів при

випробуваннях на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій / Нуянзін О.М., Некора О.В., Поздєєв С.В. [та ін.] // Монографія. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, – 120 с.

11. Методичні вказівки до науково-дослідницької практики з дисципліни «Організація наукових досліджень» (Статистичні методи. Аналіз та оформлення наукових досліджень) / І.І. Капцов, О.В. Ромашко, Л.В. Гапонова та ін. – Харків : ХНАМГ, 2009. – 59 с.

Отримано редколегією 14.03.2018

А.М. Нуянзин, С.В. Поздеев, Т.В. Самченко, Н.А. Крышталъ

Исследование адекватности математической модели тепломассообмена при пожаре в кабельном тоннеле

Целью проведения исследований является изучение адекватности математических моделей кабельных тоннелей для дальнейшего их использования при изучении температурного режима пожара. Для достижения поставленной цели на научно-исследовательском полигоне УкрНИИГЗ были проведены натурные испытания и получены данные о динамике изменения температуры в кабельном туннеле с известными геометрическими параметрами и пожарной нагрузкой. В одном из программных комплексов CFD была создана математическая модель кабельного туннеля, аналогичная натурного. Проведен вычислительный эксперимент. Моделирование, как метод научного исследования дает возможность, не выполняя материально затратных и трудоемких натурных экспериментов на моделях проводить все необходимые опыты по определению температурных режимов пожара в кабельных туннелях. Опираясь на результаты вычислительного эксперимента и натурных испытаний, были рассчитаны критерии адекватности. На основе проведенного анализа исследована адекватность используемых математических моделей. В данной работе получило дальнейшего развития применения вычислительных экспериментов для исследования процессов тепломассообмена при пожарах в кабельных туннелях.

Ключевые слова: кабельный тоннель, температурный режим пожара, критерии адекватности, натурный эксперимент, вычислительный эксперимент.

O. Nuianzin, S. Pozdieiev, T. Samchenko, M. Kryshstal

The heat exchange mathematical model of fire in cable tunnel adequacy research

The purpose of the research was to study the adequacy of mathematical models of cable tunnels for their use in the study of the temperature regime of the fire inside the tunnel. In order to achieve the set goal, the real tests and data on the dynamics of temperature changes in a cable tunnel with known geometric parameters and fire load were performed on the research ground of Ukrainian Research Institute of Civil Protection. In one of the CFD software systems, a mathematical model of a cable tunnel was created, similar to the actual one. A computational experiment was conducted. Simulation, as a method of scientific research, makes it possible, without performing costly and labor-intensive field experiments on models, to carry out all necessary experiments to determine the temperature modes of fire in cable tunnels. Based on the results of the computational experiment and field tests, the criteria for adequacy were calculated. On the basis of the analysis, the adequacy of the mathematical models used was studied. In this paper, further development of the use of computational experiments for the study of heat and mass transfer processes in fires in cable tunnels.

Keywords: cable tunnel, temperature mode of fire, criteria of adequacy, field experiment, computational experiment.