УДК 614.841.332

О. М. Нуянзін, канд. техн. наук, доцент, Т. В. Самченко, А. В. Перегін, В. М. Кришталь,
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України

ПОВНИЙ ФАКТОРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ З ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ ПОЖЕЖІ У КАБЕЛЬНИХ ТУНЕЛЯХ

Метою даної роботи була розробка та проведення повного факторного експерименту з визначення температурного режиму пожежі у кабельних тунелях з різними розмірами, аеродинамічними показниками та пожежним навантаженням.

У попередній роботі було встановлено три незалежних фактори: площа поперечного перерізу кабельного тунелю, пожежне навантаження, а також горизонтальна складова руху повітря всередині тунелю. Визначено, що для побудови математичної моделі температурного режиму пожежі у кабельному тунелі, необхідно провести повний факторний обчислювальний експеримент.

Було проведено 8 чисельних експериментів згідно з розробленої в ході досліджень матриці планування. Для визначення вихідних даних повного факторного експерименту було проведено розрахунки восьми комп'ютерних моделей у які було закладено параметри варіантів максимуму і мінімуму інтервалів у різних комбінаціях.

За результатами дослідження отримано регресії максимальної температури всередині кабельного тунелю під час пожежі, тривалості пожежі у визначеній локальній зоні кабельного тунелю та часу досягнення максимальної температури всередині кабельного тунелю під час пожежі.

У даній роботі дістало подальшого розвитку застосування обчислювальних експериментів для визначення температурних режимів пожежі при різних умовах. Також визначено температурні режими пожежі у кабельних тунелях з різними розмірами, аеродинамічними показниками та пожежним навантаженням, а також залежність температурного режиму пожежі від зазначених параметрів.

Ключові слова: *температурний режим пожежі, повний факторний експеримент, комп'ютерне моделювання, кабельний тунель.*

Постановка проблеми. Незважаючи на значні успіхи у вирішенні завдань щодо підвищення пожежної безпеки кабельної продукції в даний час також існує безліч проблемних питань, на вирішення яких спрямовані сучасні дослідження. Введення в дію Технічного регламенту [1] мало б забезпечити нормування обов'язкових вимог по цілому ряду показників пожежної безпеки кабелів і матеріалів кабельного виробництва, які раніше були встановлені тільки окремими відомчими нормами і правилами для кабелів спеціального призначення. Проте варіація кабельної продукції та способів її використання, прокладки тощо, вимагає проведення більш детального вивчення даного питання. Це сприятиме створенню єдиної нормативної бази з пожежної безпеки для кабельних виробів, а також розробки і впровадження прогресивних типів кабелів і встановлення раціональних областей їх застосування.

Горіння електричних кабелів супроводжується виділенням значної кількості тепла, яке визначається питомою теплотою згоряння матеріалів ізоляції, захисних оболонок кабелів і масою цих матеріалів, що містяться в одиниці довжини кабелю. Як показали досліди зі спалювання потоків кабелів в умовах кабельного тунелю температура в зоні горіння кабелів з ізоляцією з поліетилену або з паперовою просоченою ізоляцією досягає 1000-1200° С. При цьому спостерігається виділення значного обсягу чорного диму і інших газоподібних продуктів, що призводить до зниження видимості і ускладнює дії персоналу з гасіння пожежі та евакуації людей.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. У світі існують роботи з моделювання пожеж та їхніх небезпечних

факторів у тунелях. Наприклад, у роботі [2] розглянуто розповсюдження димових газів та зміни їх температури під час пожежі у кабельному тунелі. Однак слід зазначити, що у даній роботі досліджується лише початкова стадія пожежі. Це означає, що не визначено, температурний режим протягом усього часу пожежі.

У роботі [3] проведено польові випробування у комунальному тунелі. Моделювалась пожежа при розливі горючої рідини. Завдяки цій роботі визначено необхідний об'єм палива, що використано під час проведення експерименту у даному дослідженні.

Дослідження [4] показує, що температура в осередку реальної пожежі сягала 800-900 °С. На основі даної інформації було обрано вид термопар для заміру температур під час експерименту.

В роботі [5] встановлено, що ширина тунелю мало впливає на швидкість вигоряння пожежного навантаження. Робота [6] описує групу повномасштабних експериментів. Вимірювались розподіли температури в тунелях з різними умовами вентиляції. Проведені дослідження дали змогу визначити необхідний підпір повітря для експериментальних досліджень.

У чисельному моделюванні [7] проаналізовано причини пожеж у тунелях. Таким чином, було обрано джерело початку пожежі.

Робота [8] присвячена аналізу параметрів швидкості вигоряння ізоляції ПВХ-кабелю. Було розглянуто лінійну швидкість поширення пожежі при різному виді укладки кабелів. Незважаючи на практичну значущість таких результатів, не розглянуто в достатній мірі методи укладки кабелів у тунелях прямокутного перерізу.

Вплив двох систем вентиляції на розподіл температури у моделі тунелю невеликого перерізу досліджено у роботі [9]. Це дозволяє зробити висновок, що аеродинаміка у просторі тунелю впливає на температурний режим пожежі.

Дослідження [10] присвячене механізму генерації потоку біфуркації диму на розподіл температури в димовому шарі за висотою. Проаналізовано у роботі вплив лише горизонтальної складової швидкості повітрообміну.

Експериментальні дослідження часто проводилися в зменшених масштабах модельних тунелів, які були виготовлені з вогнетривкого скла [11] або оцинкованої сталі [12]. У даній роботі розглядається моделювання пожежі у повномасштабній моделі тунелю. Таким чином, температура пожежі максимально наближається до реальної.

Формулювання цілей статті. Мета роботи: розробити та провести повний факторний експеримент з визначення температурного режиму пожежі у кабельних тунелях з різними розмірами, аеродинамічними показниками та пожежним навантаженням. Отримано регресії максимальної температури всередині кабельного тунелю під час пожежі, тривалості пожежі у визначеній локальній зоні кабельного тунелю та часу досягнення максимальної температури всередині кабельного тунелю під час пожежі.

Виклад основного матеріалу дослідження (з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів). У роботі [13] було досліджено температурні режими пожежі у кабельних тунелях за їх різних параметрів. Для побудови математичної моделі температурного режиму пожежі у кабельному тунелі, необхідно провести повний факторний обчислювальний експеримент. При цьому встановлено три незалежних фактора – площа поперечного перерізу кабельного тунелю, пожежне навантаження, а також горизонтальна складова руху повітря всередині тунелю [13]. У табл. 1 вказані інтервали параметрів в експерименті, які обрані в якості факторів.

Таблиця 1 – Інтервали варіювання факторів в обчислювальному експерименті

Фактор 1. Пожежне навантаження у перерахунку на 1 м2 кабельного тунелю, МДж/м^2 (Далі – x1)	Фактор 2. Площа поперечного перерізу кабельного тунелю, м^2 (Далі – x2)	Фактор 3. Горизонтальна складова швидкості руху повітря, м/с (Далі – x3)
224,7-2247	2,88-4,4	0-5

Обрана математична модель являє собою лінійну залежність максимальної температури всередині кабельного тунелю від обраних факторів, що має вигляд.

$$y = b0 + b1x1 + b2x2 + b3x3 + b4x1x2 + b5x1x3 + b6x2x3 + b7x1x2x3, \quad (1)$$

де b0, b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7 – коефіцієнти регресії.

Для побудови регресії за формулою (1) необхідно провести 8 чисельних експериментів згідно з прийнятою матрицею планування, яка записана у вигляді табл. 2.

Таблиця 2 – Типова матриця планування повного факторного експерименту визначення температурного режиму пожежі у тунелі

№	x1	x2	x3	x1x2	x1x3	x2x3	x1x2x3
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. 1 показані результати експериментів.

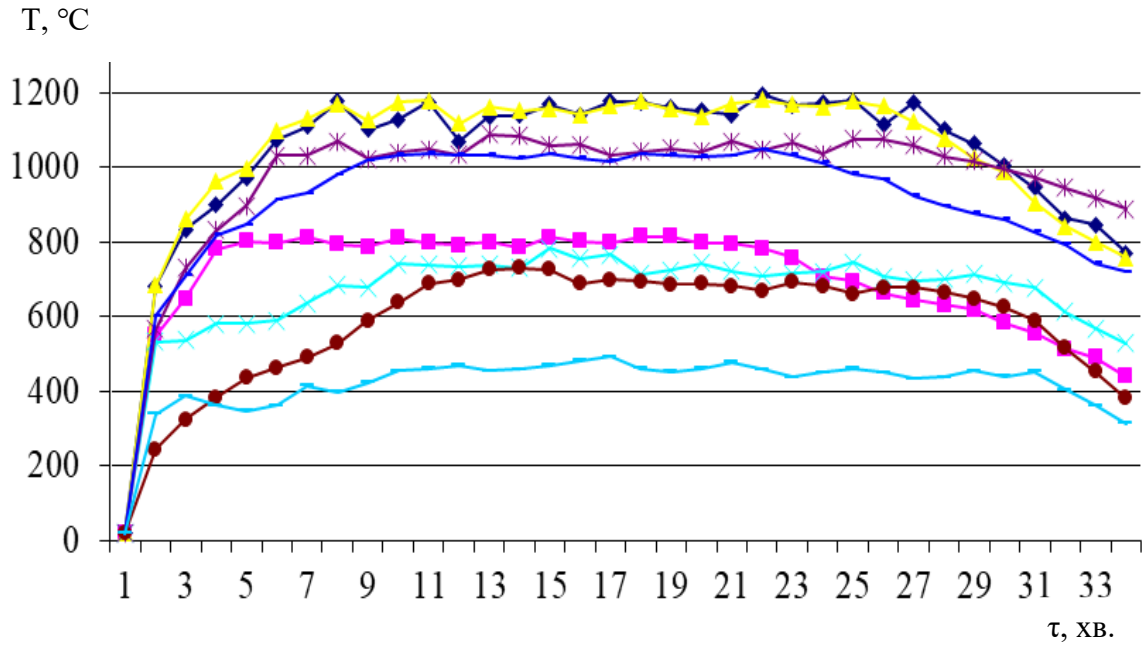
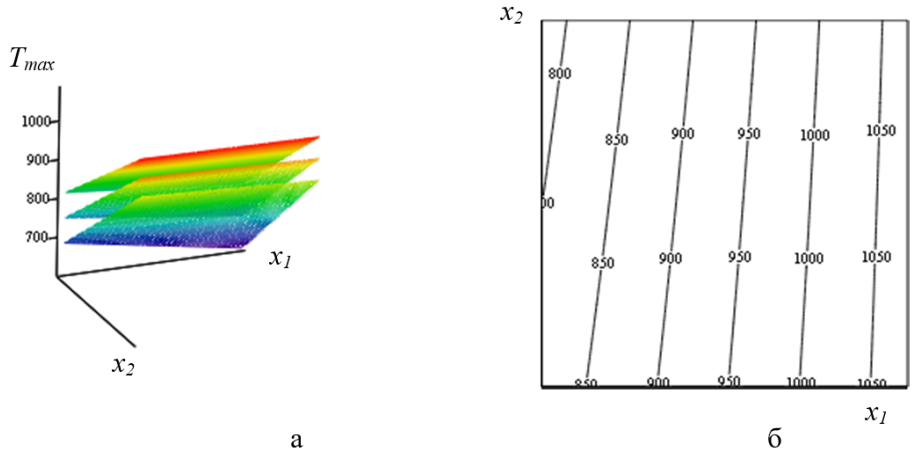


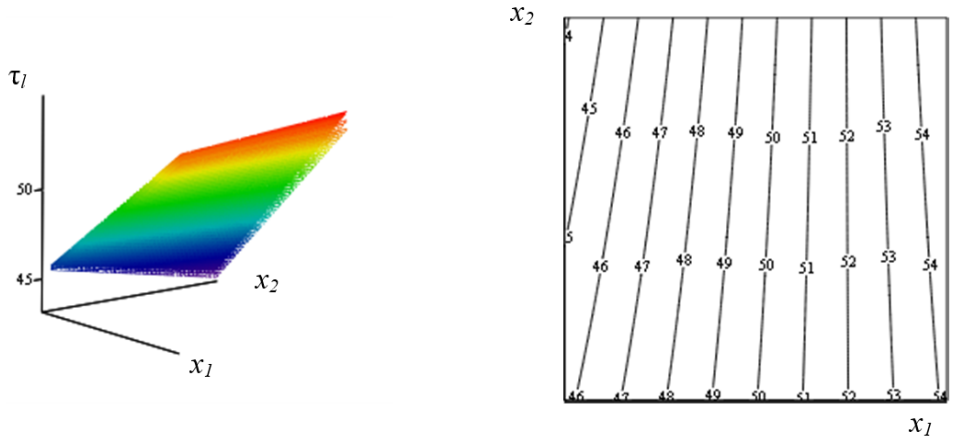
Рисунок 1 – Зведений графік розрахунку 8 комп'ютерних моделей, дані яких є вхідними для повного факторного експерименту: 1-8 – номер експерименту відповідно до табл. 2

Далі, на рис. 2 – рис. 4, представлено результати повного факторного експерименту визначення температурного режиму пожежі у тунелі.



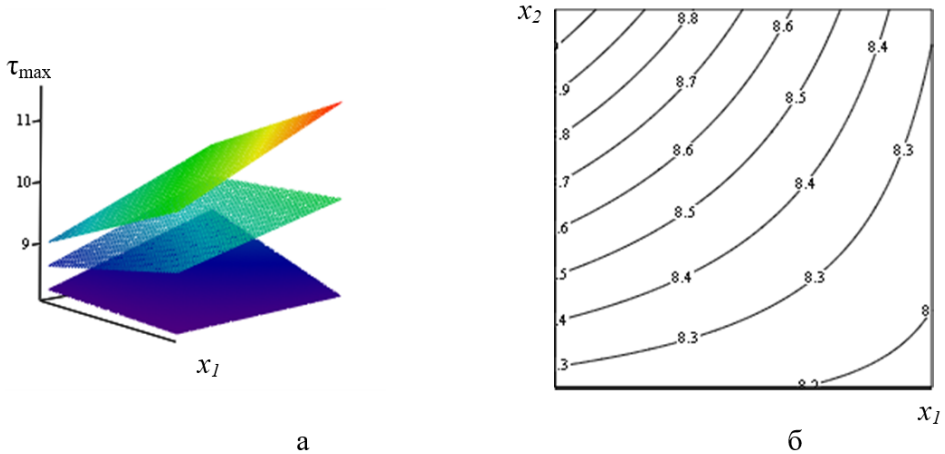
а б

Рисунок 2 – Максимальна температура всередині кабельного тунелю під час пожежі (T_{max}): а – у вигляді графіків; б – у вигляді номограм



а б

Рисунок 3 – Тривалість пожежі у певній зоні кабельного тунелю(τ_l): а – у вигляді графіків; б – у вигляді номограм



а б

Рисунок 4 – Час досягнення максимальної температури всередині кабельного тунелю під час пожежі (τ_{max}): а – у вигляді графіків; б – у вигляді номограм

За результатами повного факторного експерименту отримано регресії максимальної температури всередині кабельного тунелю під час пожежі (T_{max}), тривалості пожежі у певній локальній зоні кабельного тунелю (τ_l) та часу досягнення максимальної температури всередині кабельного тунелю під час пожежі (τmax), що представлені виразами (2), (3), (4):

$$T_{max}=870.59+0.1*x1-27.92*x2-11.39*x3+0.01*x1*x2-5.28*x2*x3 \quad (2)$$

$$\tau_l = 48.969+0.002*x1-1.439*x2+0.0125*x3+0.001*x1*x2-0.016*x2*x3 \quad (3)$$

$$\tau_{max} = 6.55+0.001*x1+0.596*x2+0.0563*x3 +0.025*x2*x3 \quad (4)$$

Висновки.

1. Розроблено та проведено повний факторний експеримент. За його результатами отримано регресії максимальної температури всередині кабельного тунелю під час пожежі, тривалості пожежі у певній локальній зоні кабельного тунелю та часу досягнення максимальної температури всередині кабельного тунелю під час пожежі, що представлені виразами (2), (3), (4).

2. Визначено температурний режим пожежі у кабельних тунелях з різними розмірами, аеродинамічними показниками та пожежним навантаженням, а також залежність температурного режиму пожежі від зазначених параметрів. При 10 прокладених кабельних лініях та пожежному навантаженні 2247 МДж/м^2 максимальна температура перевищувала 1200℃, при 1 лінії та пожежному навантаженні 224,7МДж/м^2 – 500℃.

3. При найменшій, відповідно до [1], площі поперечного перерізу тунелю та зменшенні швидкостей повітряних потоків температура всередині зростає на 50 % швидше, у порівнянні з середніми параметрами. Крім того, надлишок свіжого повітря знижує температуру горіння на 50-70℃, хоча і сприяє швидшому розповсюдженню пожежі вздовж кабельних ліній.

4. Подальшу роботу доцільно направити на дослідження вогнестійкості будівельних конструкцій кабельних тунелів при визначених у даному розділі роботи температурних режимах пожежі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ГБН В. 2.2-34620942-002:2015. Лінійно-кабельні споруди телекомунікацій. Проектування.
2. Niu Y., Li W. Simulation Study on Value of Cable Fire in the Cable Tunnel //Procedia Engineering. – 2012. – Т. 43. – С. 569-573.
3. Zhao Y., Zhu G., Gao Y. Experimental Study on Smoke Temperature Distribution under Different Power Conditions in Utility Tunnel //Case Studies in Thermal Engineering. – 2018.
4. Hsu W. S. et al. Analysis of the Hsuehshan Tunnel Fire in Taiwan //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2017. – Т. 69. – С. 108-115.
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. Brahim K. et al. Control of Smoke Flow in a Tunnel //Journal of Applied Fluid Mechanics. – 2013. – Т. 6. – №. 1.
10. Zhong W. et al. A study of bifurcation flow of fire smoke in tunnel with longitudinal ventilation //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – Т. 67. – С. 829-835.
11. 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.

12. 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.

13. Дослідження температурних режимів пожежі у кабельних тунелях за їх різних параметрів / Нуянзін О. М., Самченко Т. В., Поздєєв С. В., Кришталь М. А. // Науковий вісник «Цивільний захист та пожежна безпека», Київ : УкрНДІЦЗ, 2019. – № 1 (7). – С. 13-26.

REFERENSES

1. GBN B. 2.2-34620942-002:2015. Linijno-kabelni sporudy telekomunikacij. Proektuvannja.

2. Niu Y., Li W. Simulation Study on Value of Cable Fire in the Cable Tunnel //Procedia Engineering. – 2012. – Т. 43. – С. 569-573.

3. Zhao Y., Zhu G., Gao Y. Experimental Study on Smoke Temperature Distribution under Different Power Conditions in Utility Tunnel //Case Studies in Thermal Engineering. – 2018.

4. Hsu W. S. et al. Analysis of the Hsuehshan Tunnel Fire in Taiwan //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2017. – Т. 69. – С. 108-115.

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. Brahim K. et al. Control of Smoke Flow in a Tunnel //Journal of Applied Fluid Mechanics. – 2013. – Т. 6. – №. 1.

10. Zhong W. et al. A study of bifurcation flow of fire smoke in tunnel with longitudinal ventilation //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – Т. 67. – С. 829-835.

11. 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.

12. 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.

13. Doslidzennja temperaturnyh rezymiv pozezi u kabelnyh tuneljah za jih riznyh parametriv / Nujanzin O., Samchenko T., Pozdieiev S., Kryshtal M. // Naukovyj visnyk “Cyvilnyj zahyst ta pozezna bezpeka”, Kyiiv : UkrNDICZ, 2019. – № 1 (7). – С. 13-26.

А. М. Нуянзин, канд. техн. наук, доцент, Т. В. Самченко, А. В. Перегин, В. М. Кришталь,
Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля
Национального университета гражданской защиты Украины

ПОЛНЫЙ ФАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ПОЖАРА В КАБЕЛЬНЫХ ТУННЕЛЯХ

Целью данной работы была разработка и проведение полного факторного эксперимента по определению температурного режима пожара в кабельных туннелях с различными размерами, аэродинамическими показателями и пожарной нагрузкой.

В предыдущей работе было установлено три независимых фактора: площадь поперечного сечения кабельного тоннеля, пожарная нагрузка, а также горизонтальная составляющая движения воздуха внутри тоннеля. Определено, что для построения математической модели температурного режима пожара в кабельном тоннеле, необходимо провести полный факторный вычислительный эксперимент.

Было проведено 8 экспериментов согласно разработанной в ходе исследований матрицы планирования. Для определения исходных данных полного факторного эксперимента были проведены расчеты восьми компьютерных моделей в которые были заложены параметры вариантов максимума и минимума интервалов в различных комбинациях.

По результатам исследования получены регрессии максимальной температуры внутри кабельного тоннеля во время пожара, продолжительности пожара в определенной локальной зоне кабельного тоннеля и времени достижения максимальной температуры внутри кабельного тоннеля во время пожара.

В данной работе получило дальнейшее развитие применения вычислительных экспериментов для определения температурных режимов пожара при различных условиях. Также определены температурные режимы пожара в кабельных туннелях с различными размерами, аэродинамическими показателями и пожарной нагрузкой, а также зависимость температурного режима пожара от указанных параметров.

UDC 614.841.332

O. M. Nuianzin, Candidate of technical science, docent, T V. Samchenko,
A. V. Peregin, V. M. Kryshtal,
Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of
National University of Civil Defence of Ukraine

FULL FACTORY EXPERIMENT FOR DETERMINING FIRE TEMPERATURE MODE IN CABLE TUNNELS

The purpose of this work was to develop and conduct a full factorial experiment to determine the temperature of fire in cable tunnels with different sizes, aerodynamic parameters and fire load.

In the previous work, three independent factors were established: the cross-sectional area of the cable tunnel, the fire load, and the horizontal component of air movement inside the tunnel. determined that in order to build a mathematical model of the temperature regime of a fire in a cable tunnel, a full factorial computational experiment must be performed.

Eight numerical experiments were conducted according to the design matrix developed during the research. To determine the baseline data for the full factor experiment, eight computer models were calculated that included the maximum and minimum interval options in different combinations.

The results of the study obtained regressions of the maximum temperature inside the cable tunnel during the fire, the duration of the fire in the designated local area of the cable tunnel, and the time of reaching the maximum temperature inside the cable tunnel during the fire.

In this work, further development of the use of computational experiments to determine the temperature of fire under different conditions was further developed. The temperature modes of fire in cable tunnels with different sizes, aerodynamic parameters and fire load, as well as the dependence of the temperature of the fire on these parameters are also determined.