

В.В. Ковалишин, к.т.н., доц., ЛДУБЖД

МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРУ ВПЛИВУ ВОГНЕГАСНОГО ПОРОШКУ НА ОСЕРЕДОК ПОЖЕЖІ СПІЛЬНО З РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ ПРОДУКТІВ ГОРІННЯ

(представлено д-ром техн. наук Калугіним В.Д.)

Пожежі в кабельних тунелях на відміну від пожеж у приміщеннях, у вугільних шахтах і на інших об'єктах мають свою специфіку. З метою встановлення ефективності гасіння пожеж у кабельних тунелях різними засобами проведені паралельно експерименти в лабораторних умовах без впливу на осередок пожежі якого-небудь засобу і з впливом на нього різних засобів пожежогасіння. Встановлено, що гасіння осередку горіння порошком, як і при великомасштабних пожежах, повинно проводитися тривалий час до зниження температури до 100 - 200 °С, після чого необхідно перейти на режим рециркуляції пожежних газів або використовувати інші засоби пожежогасіння.

Ключові слова: вогнегасний порошок, рециркуляція продуктів горіння, концентрація кисню

Постановка проблеми. При розгляді процесів гасіння пожеж рециркуляцією використовується метод підрахунку циклів або кратності обміну повітря в зоні пожежі без урахування плинності часу процесів тепломасообміну [1], а при вивченні гасіння пожежі порошками вважається за головне їх доставка в осередку горіння вогнегасної концентрації [2, 3]. Проте для правильного прогнозу цих процесів необхідно розробити таку математичну модель, яка враховувала б піроліз твердих горючих матеріалів, вступ в хімічні реакції з киснем газоподібних продуктів які розкладаються, їх вплив на температуру з урахуванням надходження повітря збідненого киснем на осередок пожежі і характеру впливу на осередок вогнегасного порошку в замкнутому контурі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Публікації та останні дослідження з використанням вогнегасних порошоків для гасіння об'єктів великої і малої довжини показали [2, 3, 7], що необхідна кількість установок пожежогасіння використовується без врахування розмірів і конфігурації об'єктів, без розрахунку ефективності і терміну дії на вогнище пожежі і його температуру. Зазвичай вважається, що флегматизувальний вплив на осередок пожежі полягає в припиненні ланцюгів хімічних реакцій продуктів горіння з киснем і в утворенні плівки на поверхні горючих матеріалів, що перешкоджає проникненню кисню вглиб твердої речовини [4]. Але, як відомо, в лі-

тературі не розглядається в математичній моделі флегматизувальний вплив вогнегасного порошку на зону горіння та ще з рециркуляцією продуктів згорання в ізолюваному об'ємі.

Постановка задачі та її вирішення. Для встановлення ефективності гасіння пожеж у кабельних тунелях вогнезахисним порошком математичне моделювання впливу на осередок проводилося окремо (спочатку засобами рециркуляції, а потім порошком із застосуванням одночасно і рециркуляції).

Отримана замкнута система рівнянь на основі рівнянь тепломасопереносу [5], що дозволяє отримувати чисельними методами розв'язок задачі виникнення і розповсюдження теплоти в потоці повітря при пожежах з урахуванням динаміки концентрацій кисню

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} &= D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - qC_0 / (H_c \rho_k); \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} &= a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\alpha \Pi}{2 \rho c_p S} (T - \theta) + q / (\rho c_p); \\ \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= \frac{a_2}{2 \Delta r^2} (2T_0 - \theta + T); \end{aligned} \quad (1)$$

$$q = \frac{\chi v_0 b H_c}{S C_0} C e^{-k(wt-x)/u},$$

де C – концентрація кисню, об. частки; C_0 – початкова концентрація кисню, об. частки; T – температура повітря, К; T_0 – початкова температура повітря до пожежі, К; θ – температура навколишнього масиву, К; τ – час з моменту виникнення пожежі, с; x – поздовжня, уздовж каналу, координата, м; r – поперечна координата від стінки каналу вглиб навколишнього масиву, м; ρ – щільність повітря, кг/м³; ρ_k – щільність кисню, кг/м³; c_p – питома теплоємність повітря при постійному тиску, Дж/(кг К); u – поздовжня швидкість повітря, м/с; D – коефіцієнт дифузії кисню, м²/с; a_1 – коефіцієнт температуропровідності повітря, м²/с; a_2 – коефіцієнт температуропровідності навколишнього масиву, м²/с; S – площа поперечного перерізу каналу, м²; Π – периметр поперечного перетину каналу, м; b – ширина поверхні піролізу горючого матеріалу, м; q – інтенсивність вигорання продуктів піролізу горючих матеріалів, кВт/м³; χ – коефіцієнт неповноти згорання горючого матеріалу; H_c – теплота згорання летючих речовин, кДж/кг; k – константа швидкості реакції при піролізі, 1/с; w – швидкість руху фронту полум'я, м/с; v_0 – початкова масова швидкість надходження продуктів піролізу в потік повітря, кг/(м² с); α – коефіцієнт теплообміну потоку повітря зі стінками каналу, Вт/(м² К).

Для зручності моделювання система рівнянь (1) приведена до безрозмірного вигляду і представлена в кінцевих різницях

$$\frac{\Delta \bar{C}}{\Delta \bar{\tau}} + \frac{\Delta \bar{C}}{\Delta \bar{x}} = \frac{1}{Pe_d} \frac{\Delta^2 \bar{C}}{\Delta \bar{x}^2} - \bar{q} ABC \bar{C};$$

$$\frac{\Delta \bar{T}}{\Delta \bar{\tau}} + \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta \bar{x}} = \frac{1}{Pe_1} \frac{\Delta^2 \bar{T}}{\Delta \bar{x}^2} + St(\bar{T} - \bar{\theta}) + \bar{q} BC \bar{C}; \quad (2)$$

$$\frac{\Delta \bar{\theta}}{\Delta \bar{\tau}} = \frac{1}{Pe_2} (T - \theta);$$

$$\bar{q} = e^{-K(\bar{w}\bar{\tau} - \bar{x})}.$$

Тут введені безрозмірні параметри концентрації кисню і температур:

$$1) \bar{C} = C/C_0; \quad 2) \bar{T} = (T - T_0)/T_0; \quad 3) \bar{\theta} = (\theta - T_0)/T_0. \quad (3)$$

Характерними параметрами для часу і відстані можуть вважатися кратність обміну повітря на певній довжині, яку прийемо рівною максимальній довжині зони горіння $l = x_2 - x_1$ (рис 1).

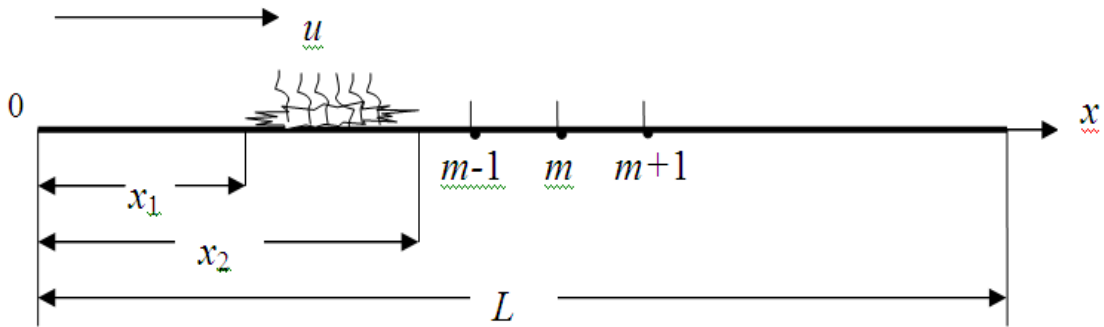


Рис.1. Схема пожежної ділянки із зазначенням зони горіння

Тоді безрозмірні відстані і час будуть рівні

$$1) \bar{x} = x/l; \quad 2) \bar{\tau} = u\tau/l. \quad (4)$$

У систему рівнянь (2) введено такі критерії подібності:

$Pe = ul/D$ – дифузійне число Пекле;

$Pe_1 = ul/a_1$ – температурне число Пекле в потоці повітря;

$Pe_2 = ul/a_2$ – температурне число Пекле в навколишньому масиві;

$St = \frac{\alpha l}{2\rho c_p Q}$ – критерій Стантона теплообміну потоку повітря з

навколишнім масивом;

$K = \frac{kl}{u}$ – критерій швидкості піролізу;

$B = \frac{\chi\nu_0 FH_c}{\rho c_p T_0 Q}$ – критерій теплової енергії пожежі;

$A = \frac{\rho c_p T_0 C_0}{\rho_k H_c}$ – критерій теплоємності повітря.

Тут добуток ширини зони горіння на її довжину, представлено, як площу поверхні, що палає: $F = bl$, яка під дією порошку зменшується.

Крайові умови для системи рівнянь (2) представлені у вигляді

$$\begin{aligned}\bar{C}(\bar{x}, 0) &= \bar{C}(0, \bar{\tau}) = \bar{C}(\infty, \bar{\tau}) = 1; \\ \bar{T}(\bar{x}, 0) &= \bar{T}(0, \bar{\tau}) = \bar{T}(\infty, \bar{\tau}) = 0; \\ \bar{\theta}(\bar{x}, 0) &= \bar{\theta}(0, \bar{\tau}) = \bar{\theta}(\infty, \bar{\tau}) = 0; \\ \bar{q}(\bar{x}_1, 0) &= B; \quad \bar{q}(\bar{x} \neq \bar{x}_1, 0) = 0.\end{aligned}\tag{5}$$

Остання крайова умова вказує на те, що в результаті займання в точці \bar{x}_1 виникає теплове джерело, яке з часом буде переміщатися і згасати згідно четвертому рівнянню системи (2).

Система рівнянь (2) розв'язувалася чисельним методом за комбінованою схемою [6] при $\bar{D} = \bar{a}_1 = 0$. У результаті отримана наступна система рівнянь

$$\begin{aligned}\bar{C}_m^{n+1} &= \frac{[1 - (Cu + \bar{q}_m^n)/2]\bar{C}_m^n + CuZ_m^n}{1 + (Cu + \bar{q}_m^n)/2}, \\ \bar{T}_m^{n+1} &= \frac{[1 - (Cu + St)/2]\bar{T}_m^n + St\bar{\theta}_m^n + B\bar{q}_m^n(\bar{C}_m^n + \bar{C}_m^{n+1})/2}{1 + (Cu + St)/2}, \\ \bar{\theta}_m^{n+1} &= \frac{(1 - \bar{a}_2/2)\bar{\theta}_m^n + \bar{a}_2\bar{T}_m^n}{1 + \bar{a}_2/2}.\end{aligned}\tag{6}$$

Тут параметр \bar{Z}_m^n означає відносну концентрацію кисню перед осередком пожежі. У розімкнутому контурі це концентрація кисню при нормальних умовах $\bar{Z}_m^n = 1$. У замкнутому контурі при рециркуляції параметр \bar{Z}_m^n знаходиться з використанням ще одного рівняння

$$V_1 \frac{dZ}{d\tau} = -(Z - C)Q + (C_0 - C)Q_1,\tag{7}$$

де V_1 – об'єм зони рециркуляції пожежних газів за винятком зони горіння, м^3 ; Q – витрата пожежних газів, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_1 – підсмоктування повітря, $\text{м}^3/\text{с}$.

Аналіз рівняння (7) показує, що зміна концентрації кисню в часі в зоні рециркуляції за межами осередку пожежі буде відбуватися за рахунок надходження в цей об'єм концентрації кисню з осередку і концентрації кисню із зовнішнього середовища. Так, за відсутності підсмоктування чистого повітря ($Q_1 = 0$), чого в реальних умовах напевно чи можна здійснити, утворюється повністю замкнений контур, а при підсмоктуванні чистого повітря до осередку пожежі ($Q_1 = Q$) контур повністю розімкнений і до осередку пожежі надходить чисте повітря з концентрацією $Z = C_0$.

Рівняння (7) в кінцевих різницях має вигляд

$$\bar{Z}_m^{n+1} = (1 - Cu_1)\bar{Z}_m^n + (1 - \bar{Q}_1)Cu_1\bar{C}_m^n + Cu_1\bar{Q}_1, \quad (8)$$

де $Cu_1 = Q\Delta\tau/V_1$ – число Куранта перед зоною горіння; $\bar{Q}_1 = Q_1/Q$ – відносна величина підсмоктування повітря.

Отримана система рівнянь (6) і (8) дозволяє моделювати процеси горіння в кабельному каналі, як без рециркуляції пожежних газів, так і при їх рециркуляції.

Будемо вважати, що на процеси горіння флегматизуючим чином впливає концентрація вогнегасного порошку, зменшуючи як інтенсивність, так і площу горіння F .

Пожежі в кабельних тунелях на відміну від пожеж у приміщеннях, у вугільних шахтах і на інших об'єктах мають свою специфіку. Для дослідження таких процесів, а також процесів гасіння пожеж різними засобами сконструйована фізична модель (рис.2), що представляє собою установку або камеру для визначення ефективності горіння кабельної продукції та її ефективності гасіння різними засобами в замкнутому об'ємі.

Довжина камери становить 2 м, а її висота і ширина у просвіті 0,6 м і 0,4 м відповідно. Таким чином, наведений діаметр камери дорівнює

$$d = \frac{4S}{\Pi} = \frac{4 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{2(0,6 + 0,4)} = 0,48 \text{ м.}$$

При реальному наведеному діаметрі кабельного тунелю 2 м геометричний масштаб моделювання становить 1:4.

Потужність витяжної вентиляції забезпечує рух повітряного потоку в середині камери від 0,024 до 0,076 м³/с із середньою швидкістю 0,1 - 0,3 м/с. Це відповідає числу Рейнольдса

$$Re = \frac{ud}{\nu} = \frac{(0,1 - 0,3) \cdot 0,48}{1,5 \cdot 10^{-5}} \approx 3000 - 10000.$$

Таким чином, режим руху газів в камері турбулентний, як в реальному об'єкті, тобто більше межі ламінарного руху, рівного 2000.

Кабельна продукція розміщується на лотках на висоті 20, 30 см від нижнього рівня камери. У камеру згоряння завантажують 7,25 кг кабельної продукції, з якої 5 кг це горюча ізоляція, кабелі довжиною 1 м, п'ять частин займають площу 0,3 м². Підпалюють кабельну лінію протягом 4 хв газовим пальником.

Максимальна температура в камері досягає 700-800 °С на 10-12 хв. вільного горіння.

Під час горіння кабельного ізоляційного матеріалу проходить утворення значної кількості продуктів згорання, що викликає зменшення притоку свіжого повітря в камеру. На початку розвитку горіння температура швидко зростає за рахунок достатньої кількості кисню в камері. Із зменшенням припливу повітря температура горіння знижується до 470–500 °С і має хвилеподібний процес горіння до початку затухання.

З метою встановлення ефективності гасіння пожеж у кабельних тунелях різними засобами проведені паралельно експерименти в лабораторних умовах без впливу на осередок пожежі якого-небудь засобу і з впливом на нього різних засобів пожежогасіння.

При гасінні осередку пожежі порошком і рециркуляцією проведений цілий цикл експериментів.

Вільне горіння триває 5-6 хвилин до максимального зростання температури, а це 700 – 750 °С. Гасіння проводиться при досягненні температури 700 °С. Мінімальний приплив повітря в камері для підтримання горіння 5 кг кабельної ізоляції був 0,0235 м³/с.

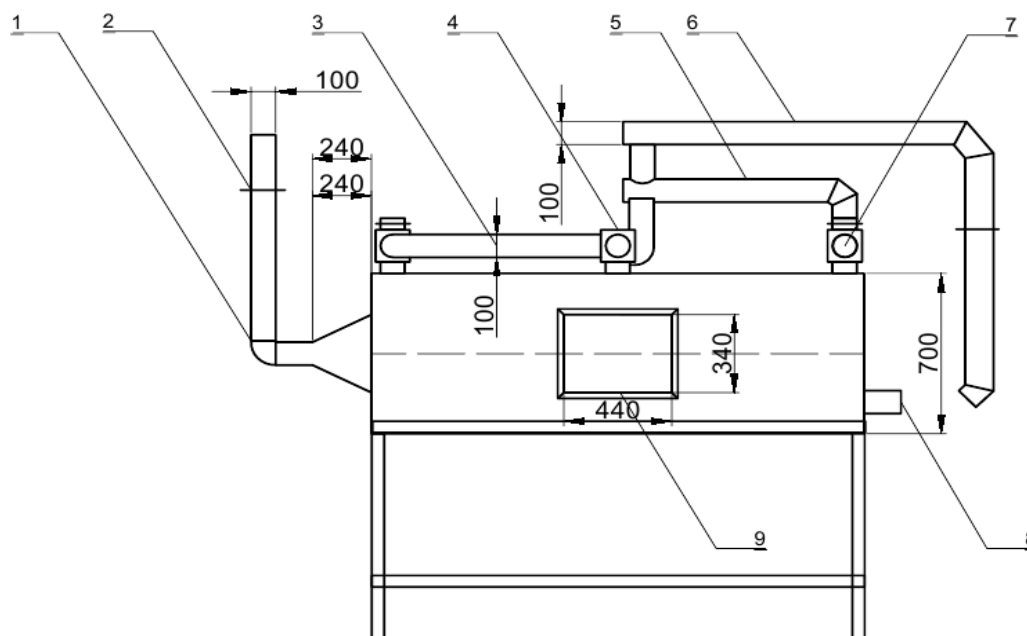


Рис. 2 – Установка визначення горіння кабелю та ефективності гасіння різними вогнегасними речовинами в закритих об'ємах класу «А», «В», «Е»: 1 – трубопровід для видалення в атмосферу, 2 – шубер, 3 – холодильник, 4 – вентилятор з електродвигуном, 5,6 – трубопровід для проведення рециркуляції, 7 – отвір для подачі вогнегасного порошку, 8 – отвір для підсмоктування повітря, 9 – оглядове вікно.

Розрахунки за формулами (6) і (8) в розімкнутому контурі при горінні в кабельному тунелі, і при рециркуляції показали, що їх результати добре узгоджуються з даними експериментів.

На рис. 3 представлені експериментальні та розрахункові дані динаміки температури пожежних газів при їх рециркуляції.

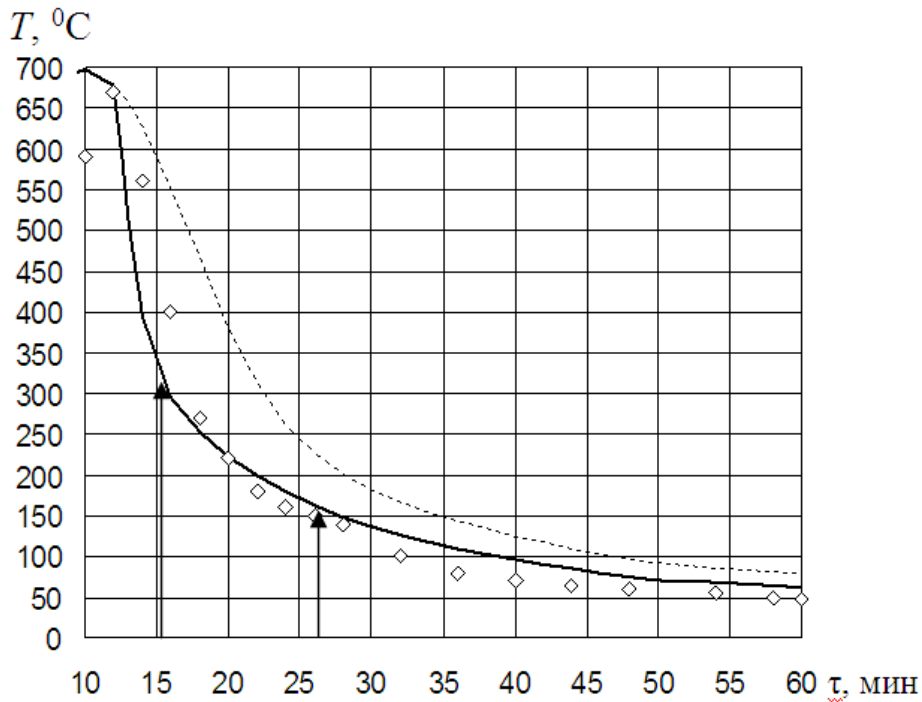


Рис. 3 – Результати порівняння розрахункових і експериментальних даних динаміки максимальної температури пожежних газів при їх рециркуляції в кабельному тунелі (маркери – експериментальні дані, суцільна крива – розрахункові дані при рециркуляції, переривчаста лінія – розрахункові дані без рециркуляції)

Тут стрілками вказані початок і кінець рециркуляції. Очевидно, більш тривала рециркуляція привела б до більшого ефекту.

При розрахунках для найкращої збіжності розрахункових і експериментальних даних прийнято число Куранта в рециркулювальному потоці $Cu_1 = 0,05$ і відносні підсмоктувачі повітря $\bar{Q}_1 = 0,1$. Інші параметри прийняті в діапазоні: $Cu = 0,5$ і $B = 5$.

На рис. 4 наведені розрахункові та експериментальні дані впливу на осередок пожежі вогнегасним порошком і короткочасною рециркуляцією пожежних газів.

Як видно (рис. 4), дані моделювання, достовірно відтворюють і процеси горіння і гасіння пожежі. Однак короткочасна подача порошку всього 0,5 хв і рециркуляція 2 хв, як видно, майже не роблять помітного впливу на гасіння пожежі.

При розрахунках в цьому випадку прийнято також число Куранта в рециркулювальному потоці $Cu_1 = 0,05$ і відносні підсмоктувачі повітря $\bar{Q}_1 = 0,1$. У той же час число Стантона $St = 0,6$ і параметр $B = 10$. Подача порошку привела, як показують розрахункові дані, до зменшення поверхні горіння F на 20%.

На рис. 5 наведені розрахункові та експериментальні дані впливу на осередок пожежі вогнегасним порошком 2 кг протягом 50

с і рециркуляцією пожежних газів протягом 10 хв.

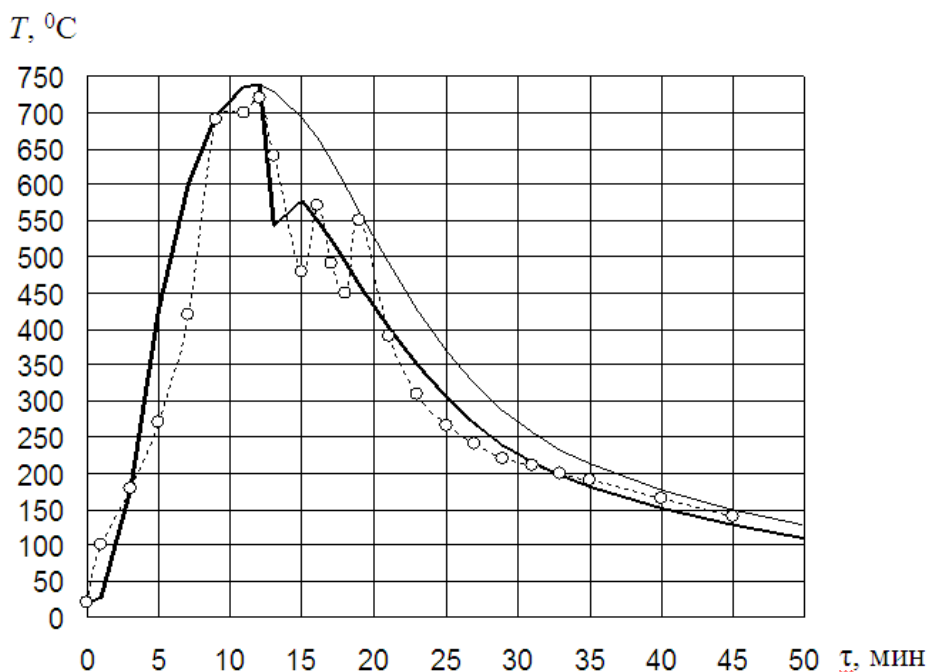


Рис. 4. Результати порівняння розрахункових і експериментальних даних динаміки максимальної температури пожежних газів при їх короткочасній рециркуляції і подачі порошку на протязі 30 с в кабельному тунелі (маркери - експериментальні дані, жирна лінія - розрахункові дані при рециркуляції, тонка - розрахункові дані без рециркуляції і без подачі порошку)

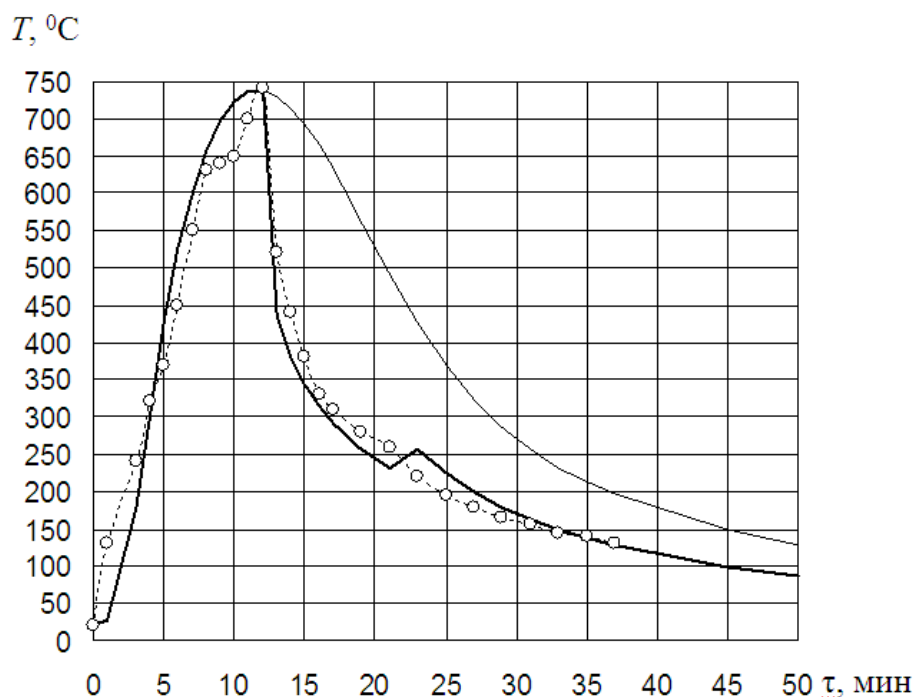


Рис. 5 – Результати порівняння розрахункових і експериментальних даних динаміки максимальної температури пожежних газів при їх тривалій рециркуляції 10 хв та подачі порошку 2 кг протягом 50 с в кабельному тунелі (маркери – експериментальні дані, жирна лінія – розрахункові дані при рециркуляції, тонка – розрахункові дані без рециркуляції і подачі порошку)

Більш тривала подача порошку привела, як показують розрахункові дані, до зменшення поверхні горіння на 30%.

Висновки. Таким чином, експерименти в лабораторних умовах показали, що короткочасне гасіння пожежі порошком не дає позитивних результатів, тому що через деякий час знову виникає полум'яне горіння. Тому необхідно вдаватися до повторної подачі порошку і рециркуляції пожежних газів. Звідси випливає, що гасіння осередку горіння порошком, як і при великомасштабних пожежах, повинно проводитися тривалий час до зниження температури до 100 - 200 °С, після чого необхідно перейти на режим рециркуляції пожежних газів або використовувати інші засоби пожежогасіння.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дмитровский С. Ю. Динамика температуры в кабельных туннелях при рециркуляции продуктов горения / С. Ю. Дмитровский, А. В. Ревякин // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. – Донецк: НИИГД, 2006. – Вып. 43. – С. 90 – 96.

2. Король А. А. Дистанционное тушение подземных пожаров тонкодисперсным порошком / А. А. Король // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: Сполом, 2001. – С. 213 – 215.

3. Пашковский П. С. Математическая модель переноса тонкодисперсного огнетушащего порошка в проветриваемой горной выработке / П. С. Пашковский, А. А. Король // Науковий вісник.– Київ: УкрНДІПБ МНС України, 2002. – №1 (5). – С. 43 – 48.

4. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздейл //– М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.

5. Лыков А. В. Тепломассообмен (Справочник) / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1980. – 580 с.

6. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432с.

7. Король А.А. Количество огнетушащего порошка для автоматической противопожарной защиты подземных объектов/ А.А.Король, А.В. Осадчий, В.В. Гуржий // Горноспасательное дело: Сб. науч тр. / НИИГД "Респиратор". – Донецк, 2009. – С. 108 – 112.

В.В. Ковалишин

Моделирование характера влияния огнетушащего порошка на очаг пожара совместно с рециркуляцией продуктов горения.

Пожары в кабельных туннелях в отличие от пожаров в помещениях, в угольных шахтах и на других объектах имеют свою специфику. С целью установления эффективности тушения пожаров в кабельных туннелях различными средствами проведены параллельно эксперименты в лабораторных условиях

без воздействия на очаг пожара какого-либо средства и с влиянием на него различных средств пожаротушения. Установлено, что тушение очага горения пороком, как и при крупномасштабных пожарах, должно проводиться длительно к снижению температуры до 100 - 200 °С, после чего необходимо перейти на режим рециркуляции пожарных газов или использовать другие средства пожаротушения.

Ключевые слова: огнетушащий порошок, рециркуляция продуктов горения, концентрация кислорода

V.V. Kovalyshyn

Modeling the character of extinguishing powders cell fire together with recirculation of combustion products.

The fires in cable tunnels as opposed to fires in areas in coal mines and other objects have their own specificity.

To establish the effectiveness of extinguishing fires in cable tunnels in various ways in parallel experiments conducted in laboratory conditions without affecting the cell fires of any vehicle and with the influence of various means of extinguishing it. Found that fire burning dust cell-com, as in large-scale fires, should be a long time in its provisions to the reduction temperature to 100 - 200 °С, and then to go to the recirculation mode of fire gases or use other means of fire.

Keywords: extinguishing powder, recirculation of combustion products, the concentration of oxygen.