

УДК 614.8

*В.В. Ковалишин, д-р техн. наук, доц.***ПЕРЕВІРКА НА АДЕКВАТНІСТЬ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ І ГАСІННЯ ПОЖЕЖ В КАБЕЛЬНИХ ТУНЕЛЯХ (В ОБМЕЖЕНИХ ОБ'ЄМАХ)**

Розроблена математична модель для прогнозу розвитку та припинення горіння. Проведені експерименти на маломасштабних пожежах підтвердили її адекватність.

Ключові слова: небезпечні фактори пожежі, моделювання процесів горіння і гасіння, установка з визначення ефективності гасіння, температура.

*V. Kovalyshyn, Doc. of Sc. (Eng.), Docent***CHECK THE ADEQUACY MODELING OF DEVELOPMENT AND EXTINGUISHING FIRES IN CABLE TUNNELS (IN A LIMITED VOLUME)**

A mathematical model for predicting the development and stop burning. Experiments on small-scale fires confirmed its adequacy.

Keywords: hazards of fire, combustion modeling and extinguishing installation to determine the efficiency, temperature.

В попередніх дослідженнях проведено ряд експериментів з дослідження процесів горіння кабелів при різних умовах вентиляції [1]. Для прогнозу процесів горіння та гасіння в закритих об'ємах необхідно розробити математичну модель, яка враховує піроліз твердих горючих матеріалів, вплив на температуру хімічних реакцій газоподібних продуктів з киснем. Це повинно бути підтверджено експериментальними дослідженнями [1,2].

Дослідження проводилось в створеній установці з дослідження процесів горіння та гасіння з довжиною камери 2 м, а її висота і ширина у просвіті дорівнювали відповідно 0,6 м і 0,4 м, а наведений діаметр камери d дорівнює:

$$d = \frac{4S}{\Pi} = 0,48 \text{ м.}$$

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

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

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

В такому випадку, режим руху газів у камері є турбулентним як на реальному об'єкті, тобто – значно більшим за поріг ламінарного руху, що дорівнює 2000.

Кабельна продукція розміщується на лотках на висоті 20, 30 см від нижнього рівня камери. В 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 з робочою довжиною 30 см. За цей час настає стійке горіння.



Рисунок 1 — Установка визначення горіння кабелю та ефективності гасіння різними вогнегасними речовинами в закритих об'ємах

Експерименти проходять за умов, вказаних у [1]

Експериментальні дані, отримані в лабораторних умовах показали, що під час виникнення навіть незначної пожежі, концентрація кисню спочатку різко знижується і досягає значення 5% всього через 8 – 10 хв з урахуванням тривалості розпалювання. Після цього у міру загасання пожежі концентрація кисню поступово відновлюється, що наочно представлено на рис. 3.

Отримана замкнута система рівнянь на основі рівнянь тепломасопереносу [3], що дозволяє отримувати чисельними методами розв'язок задачі виникнення і розповсюдження теплоти в потоці повітря при пожежах з урахуванням динаміки концентрацій кисню

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} &= D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - q C_0 / (H_c \rho_k); \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} &= a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\alpha \Pi}{2 \rho c_p S} (T - \theta) + q / (\rho c_p); \\ \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= \frac{a_2}{2 \Delta r^2} (2 T_0 - \theta + T); \\ q &= \frac{\chi \nu_0 b H_c}{S C_0} C e^{-k(wt-x)/u}, \end{aligned} \quad (1)$$

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, $\text{м}^2/\text{с}$; a_1 – коефіцієнт температуропровідності повітря, $\text{м}^2/\text{с}$; a_2 – коефіцієнт температуропровідності навколишнього масиву, $\text{м}^2/\text{с}$; S – площа поперечного перерізу каналу, м^2 ; Π – периметр поперечного перетину каналу, м ; b – ширина поверхні піролізу горючого матеріалу, м ; q – інтенсивність вигорання продуктів піролізу горючих матеріалів, $\text{кВт}/\text{м}^3$; χ – коефіцієнт неповноти згорання горючого матеріалу; H_c – теплота згорання летючих речовин, $\text{кДж}/\text{кг}$; k – константа швидкості реакції при піролізі, $1/\text{с}$; w – швидкість руху фронту полум'я, $\text{м}/\text{с}$; v_0 – початкова масова швидкість надходження продуктів піролізу в потік повітря, $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$; α – коефіцієнт теплообміну потоку повітря зі стінками каналу, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$.

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

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \bar{C}}{\Delta \bar{\tau}} + \frac{\Delta \bar{C}}{\Delta \bar{x}} &= \frac{1}{Pe_d} \frac{\Delta^2 \bar{C}}{\Delta \bar{x}^2} - \bar{q} A B \bar{C}; \\ \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta \bar{\tau}} + \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta \bar{x}} &= \frac{1}{Pe_1} \frac{\Delta^2 \bar{T}}{\Delta \bar{x}^2} + St(\bar{T} - \bar{\theta}) + \bar{q} B \bar{C}; \\ \frac{\Delta \bar{\theta}}{\Delta \bar{\tau}} &= \frac{1}{Pe_2} (T - \theta); \\ \bar{q} &= e^{-K(\bar{w} \bar{\tau} - \bar{x})}. \end{aligned} \quad (2)$$

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 2).

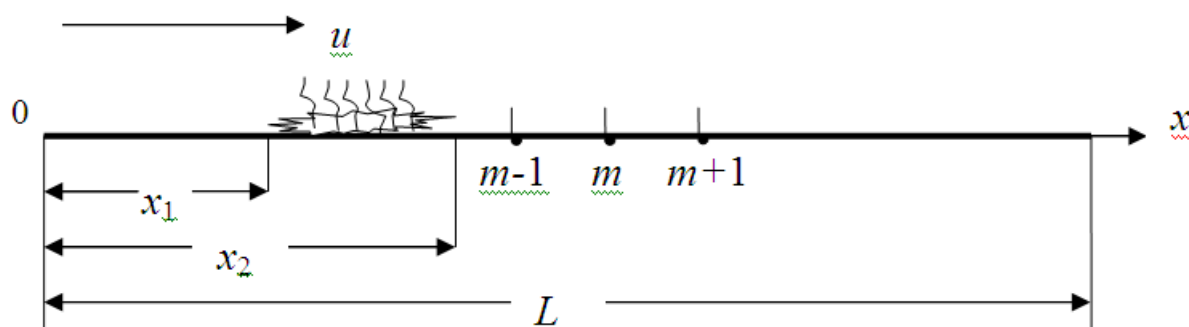


Рис.2. Схема ділянки із зазначенням зони горіння

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;

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

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

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

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

Добуток ширини зони горіння на її довжину, представлено, як площу поверхні, що палає: $F = bl$, яка під дією вогнегасної речовини зменшується.

Крайові умови для системи рівнянь (2) представлені у вигляді

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

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 [4] при $\bar{D} = \bar{a}_1 = 0$. У результаті отримана наступна система рівнянь

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

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, m^3 ; Q – витрата пожежних газів, m^3/c ; Q_1 – підсмоктування повітря, m^3/c .

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 навряд чи можна здійснити, утворюється повністю замкнутий 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.

На рис. 3 представлені експериментальні та розрахункові дані динаміки зміни в часі концентрації кисню в кабельному тунелі під час пожежі без впливу на нього будь-якого засобу пожежогасіння.

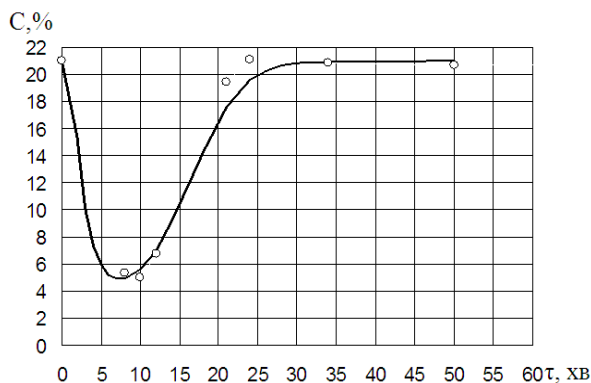


Рисунок 3 — Динаміка змінення концентрації кисню в кабельному тунелі під час пожежі із самозагасанням (маркери – дані експерименту, суцільна лінія – дані чисельного розрахунку на ЕОМ)

Як видно, концентрація кисню в даному експерименті знизилась навіть до 5 %, при цьому бачимо, що розбіжність теоретичних та експериментальних досліджень не перевищує 7%.

На рис. 4 представлені експериментальні та розрахункові дані динаміки в часі змінення температури в кабельному тунелі під час пожежі без впливу на нього будь-якого засобу пожежогасіння.

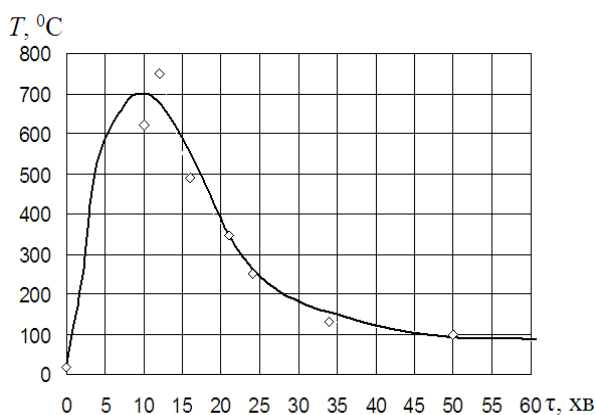


Рисунок 4 — Експериментальні та розрахункові дані динаміки змінення температури в кабельному тунелі при пожежі без впливу на нього будь-якого засобу пожежогасіння (маркери – дані експерименту, суцільна лінія – дані чисельного розрахунку на ЕОМ)

Вхідні до формули (6) параметри при розрахунках прийняті рівними: $Cu = 0,5$; $\bar{D} = \bar{a}_1 = 0$; $\bar{a}_2 = 0,0006$; $St_c = 16$; $A = 0,02$; $B = 6000$. Порівняння розрахункових і експериментальних даних рис.3 і рис.4 доводить, що вони задовільно узгоджуються між

собою і не перевищують 15%. Стає очевидним нерозривність зв'язку температури і кисню, особливо при застосуванні рециркуляції пожежних газів.

Деяка невідповідність максимальної температури мінімальній концентрації кисню пояснюється процесами теплообміну пожежних газів з навколишнім масивом і алюмінієвими провідниками. Результати чисельних розрахунків в графічному вигляді при рециркуляції пожежних газів наведені на рис. 5.

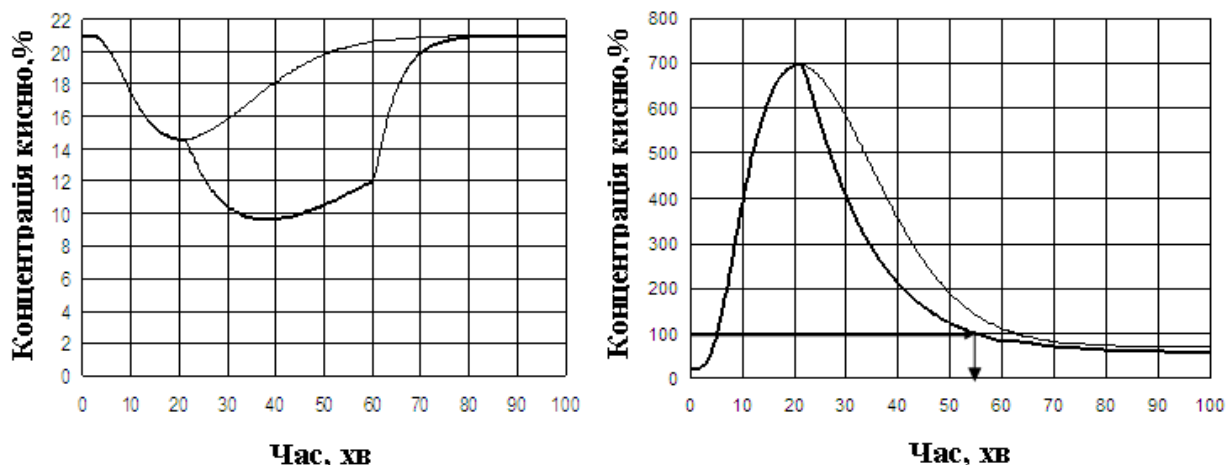


Рисунок 5 — Динаміка змінення концентрації кисню і температури в ізолюваному відсіку тунелю при розвитку пожежі без застосування засобів пожежогасіння (тонкі лінії) і при рециркуляції продуктів згоряння (жирні лінії) протягом 40 хвилин

Як показують результати розрахунків, рециркуляція пожежних газів протягом 40 хвилин, починаючи з 21-ї хвилини, не дає помітних результатів, незважаючи на те, що концентрація кисню на короткий час знижувалася до 9%. Так, час загасання пожежі зменшується всього на 10 хвилин. Це пояснюється великим об'ємом ізолюваного відсіку 160 м^3 при довжині зони горіння, $l_m = 5,6 \text{ м}$ і швидкості повітря $u = 0,15 \text{ м/с}$. Тому рециркуляцію пожежних газів доцільно здійснювати спільно з іншими засобами пожежогасіння.

Таким чином, за допомогою математичного моделювання пожеж у кабельних тунелях можна не тільки досліджувати процеси горіння, а й прогнозувати ефективність впливу на них різних засобів пожежогасіння.

Слід також відзначити, що створена установка для дослідження процесів горіння та визначення ефективності гасіння різними вогнегасними речовинами в закритих об'ємах (рис.1) може бути використана для визначення небезпечних факторів пожежі та вивчення продуктів піролізу горючих матеріалів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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. Ковалишин В. В. Дослідження з визначення небезпечних факторів пожежі в тунелях / В. В. Ковалишин // Вісник ЛДУБЖД : Зб. наук. праць. – Л., 2013. – № 9. – С. 129-135.
3. Лыков А. В. Тепломассообмен (Справочник) / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1980. – 580 с.
4. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432с.

