

УДК 614.841

Ковалишин В.В., д-р техн. наук, ст. наук. співроб.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ І ГАСІННЯ ПОЖЕЖ РІЗНИМИ ЗАСОБАМИ НА ОБ'ЄКТАХ ЗНАЧНОЇ ПРОТЯЖНОСТІ

На основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень та узагальненого підходу до застосування засобів гасіння пожеж на об'єктах значної протяжності розроблена універсальна математична модель, реалізація якої на ЕОМ дозволяє в наочному графічному вигляді дати прогноз ефективності застосування одного з п'яти можливих засобів пожежогасіння: рециркуляцією пожежних газів, порошком, диспергованою водою, парогазовою сумішшю або піною на основі продуктів згоряння. Крім того є можливість наочної оцінки вогнегасних засобів при їх комбінованому застосуванні.

Ключові слова: об'єкти значної протяжності, пожежа, гасіння, порошок, диспергована вода, піна, рециркуляція, парогазова суміш, математична модель.

V. Kovalyshyn., Doct. of Sc. (Eng.), Sen. St. Sc.

MATHEMATICAL MODELING OF THE FIRE DEVELOPMENT AND FIRE EXTINGUISHING PROCESS WITH VARIOUS MEANS AT OBJECTS OF CONSIDERABLE LENGTH

A universal mathematical model has been developed on the basis of theoretical and experimental researches as well as generalized approach at some objects of considerable length, and its realization on a personal computer allows rendering a forecast of the efficiency of one of the five possible methods of fire-fighting namely by recirculation of fire gases as well as application of a dry chemical, sprayed water, a steam and gas mixture, and foam obtained using combustion products. Moreover, an opportunity for the estimation of the efficiency of fire-fighting means at their combined application is available.

Keywords: objects of considerable length, fire, extinguishing, dry chemical, dispersed water, foam, recirculation, steam and gas mixture, mathematical model.

Узагальнення результатів математичного моделювання та експериментальних даних з розвитку та гасіння пожеж різними засобами на об'єктах значної протяжності дозволяє створити універсальну математичну модель. Така модель повинна дати можливість у разі застосування того чи іншого засобу пожежогасіння або їх комбінації провести розрахунки параметрів інтенсивності і часу ефективного впливу на осередок, а також визначати загальну кількість вогнегасної речовини, що витрачається. Вибір речовини якою можна найефективніше погасити пожежу проводиться за часом гасіння, в першу чергу.

Відомо, [1-6] 2, 5-3, 7-4, 8-5, 9-6], що при розробці математичних моделей гасіння пожеж розглядають один який-небудь засіб впливу на осередок пожежі, до того ж, часто, без врахування впливу концентрації кисню на температуру. Деякі запропоновані математичні моделі або засновані на розгляді теплового балансу в осередку пожежі тому і є статичними методами [1], або базуються на розгляді тільки динаміки температури в осередку пожежі [7, 8] 3, 4.

Тому створення достатньо точної математичної моделі гасіння пожеж різними засобами дозволить науково обґрунтовано прогнозувати як вибір засобів гасіння кожної конкретної пожежі, так і проводити розрахунки необхідної інтенсивності та тривалості гасіння пожежі.

Усі задачі розрахунку теплових і газодинамічних параметрів на об'єкті під час пожежі можна розбити на два класи: задачі виникнення і розвитку пожежі без застосування засобів гасіння і з їх застосуванням.

До першого класу належать задачі природного розвитку і загасання пожежі при первісному завданні конкретних вихідних даних.

До другого класу належать задачі оперативного прогнозу і реагування на ситуацію, що трапилася шляхом застосування того чи іншого засобу пожежогасіння. При цьому в першу чергу необхідно знати місце і час виникнення пожежі, а також задати час з моменту початку і кінця гасіння пожежі для визначення очікуваної ефективності впливу на зону горіння.

На підставі результатів теоретичних і експериментальних досліджень в натурних і лабораторних умовах розроблений підхід до математичного моделювання розвитку та гасіння пожеж різними засобами, до яких відносяться:

- 1) рециркуляція пожежних газів в ізольованому обсязі;
- 2) інертизування атмосфери ізольованого відсіку каналу шляхом подавання в нього парогазової суміші або інертного газу чи того й іншого одночасно;
- 3) порошкові засоби пожежогасіння;
- 4) подавання диспергованої води в осередок пожежі;
- 5) подавання піни, інертизованої пожежними газами при їх рециркуляції в замкненому контурі;
- 6) комбіноване гасіння з використанням вище перелічених способів.

Для опису динаміки під час процесів горіння і гасіння пожеж в ізольованому відсіку каналу використано зональну модель з виділенням зони горіння і решти ізольованого об'єму.

Математичне моделювання динаміки зміни кількості кисню з часом, в осередку пожежі та за його межами, проводилось чисельним методом з використанням диференціальних рівнянь нестационарного переносу маси, які вирішувалися чисельним методом за комбінованою схемою (явної і неявної з однаковою питомою вагою) і зведені до системи алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned} \bar{C}^{n+1} &= \frac{[1 - (Cu + AB\bar{q}^n) / 2] \bar{C}^n + Cu\bar{Z}^n}{1 + (Cu + AB\bar{q}^n) / 2}; \\ \bar{Z}^{n+1} &= (1 - \bar{V}Cu)\bar{Z}^n + m(1 - \bar{Q}_1)\bar{V}Cu(\bar{C}^n - 1) + \bar{V}Cu[1 + m(\bar{C}_1 - 1)], \end{aligned} \quad (1)$$

де $\bar{C} = C / C_0$ – відносна концентрація кисню в зоні горіння; $\bar{Z} = Z / C_0$ – відносна концентрація кисню поза зоною горіння в ізольованому об'ємі; $\bar{C}_1 = C_1 / C_0$ – концентрація кисню на вході в ізольований об'єм при гасінні пожежі парогазовою сумішшю або інертними газами; $\bar{V} = l_m / L$ – відносний об'єм зони горіння; $\bar{Q}_1 = Q_1 / Q$ – відносна величина підсмоктування повітря при рециркуляції пожежних газів (при $Q_1 = Q$ рециркуляція відсутня, а при $Q_1 = 0$ контур рециркуляції повністю замкнутий); n – номер попереднього тимчасового шару при розрахунках; $n + 1$ – номер поточного тимчасового шару для визначення шуканих параметрів; \bar{q}^n – відносна інтенсивність тепловиділення в осередку пожежі на тимчасовому шарі n ; u – швидкість руху пожежних газів, м/с; l_m – довжина зони горіння, м; L – довжина ізольованого відсіку каналу, м; Δt – крок за часом, с.

Система рівнянь (1) дозволяє моделювати динаміку під час концентрації кисню в ізольованому каналі до осередку і в осередку, як без рециркуляції пожежних газів, так і при їх рециркуляції, а також при подачі інертних газів на заданому інтервалі часу. При цьому в початковий час концентрація кисню перед осередком пожежі приймається рівною $\bar{Z}^0 = Z / C_0 = 1$.

Математичне моделювання динаміки в часі температури в зоні горіння і в масиві навколо каналу масиву виконується також чисельним методом за комбінованою схемою з

використанням диференціальних рівнянь збереження теплової енергії та нестационарного теплообміну пожежних газів з навколишнім масивом, які зведені до системи алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned} \bar{T}^{n+1} &= \frac{\{1 - Cu/2\}\bar{T}^n + Cu[BC^n \bar{q}^n + St(\bar{\theta}^n - \bar{T}^n/2) - \bar{r}U\bar{\chi}^n]/(1 + U\bar{\chi}^n)}{1 + Cu/2 + CuSt/(1 + U\bar{\chi}^n)/2}, \\ \bar{\theta}^{n+1} &= \frac{(1 - Fo/2)\bar{\theta}^n + Fo\bar{T}^n/2}{1 + Fo/2}, \end{aligned} \quad (2)$$

де частка вологи, що випарувалася при подачі диспергованої води або піни визначається на кожному часовому шарі за формулою

$$\bar{\chi}^{n+1} = m \left\{ 1 - \frac{[1 - Cu(1 + \bar{\gamma}\bar{T}^n)/2](1 - \bar{\chi}^n) + Cu}{1 + Cu(1 + \bar{\gamma}\bar{T}^n)/2} \right\}. \quad (3)$$

Тут $\bar{T} = T/T_0 - 1$ – безрозмірна температура пожежних газів; $\bar{\theta} = \theta/T_0 - 1$ – безрозмірна температура навколишнього масиву; $\bar{\gamma} = \mathcal{A}_m/d_k$ – відносна швидкість випаровування вологи; γ – емпірична константа швидкості випаровування вологи, яка приймається рівною 0,001; d_k – діаметр крапель рідини, мм; m – множник, рівний «1» при застосуванні будь-якого засобу пожежогасіння або рівний «0» без його застосування.

Множник m якраз і визначає початок і кінець застосування будь-якого засобу пожежогасіння і приймається рівним

$$m = 0,25 \left(1 + \frac{\tau - \tau_1}{|\tau - \tau_1|} \right) \left(1 + \frac{\tau_2 - \tau}{|\tau_2 - \tau|} \right), \quad (4)$$

де τ_1 і τ_2 – час відповідно початку і кінця гасіння пожежі, хв. Використання модуля числа у формулі (4) дозволяє без всяких умовних переходів включати в дію той чи інший засіб пожежогасіння.

У систему рівнянь (1) – (3) введені наступні критерії подібності:

$Cu = u\Delta\tau/l_m$ – число Куранта, прийняте рівним 0,5 для стійкості рахунку;

$Fo = Cu / Re = a\Delta\tau/\Delta r^2$ – число Фур'є нагріву і охолодження навколишнього масиву;

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

масивом;

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

$B = \frac{\chi v_0 F H_c}{\rho c_p T_0 Q}$ – критерій теплової енергії пожежі;

$\bar{r} = \frac{r + c_n T_0}{c_p T_0}$ – питома теплота пароутворення;

$U = \frac{c_n G_2}{c_p \rho Q}$ – питома витрата рідини,

де G_2 – масова витрата рідини при гасінні пожежі диспергованою водою або піною, кг/с;

Q – витрата повітря при гасінні пожежі, м³/с.

Параметри, що входять в критерій подібності, приймаються для всіх випадків за константи. До них відносяться: $\rho = 1,2$ кг/м³ – густина повітря; $\rho_k = 1,32$ кг/м³ – густина кисню; $\rho_e = 1000$ кг/м³ – густина води; $c_a = 1,04$ кДж / (кг·К) – питома теплоємність повітря; $c_n = 1,93$ кДж/(кг·К) – питома теплоємність пари; $C_0 = 0,21$ – концентрація кисню в зовнішньому повітрі; $T_0 = 293$ К – температура при нормальних умовах; $r = 2500$ кДж/кг – теплота пароутворення; $H_c = 13000$ кДж/кг – теплота згоряння твердого палива; $a = 5 \cdot 10^{-7}$ м²/с – коефіцієнт температуропровідності масиву з бетону і цегли.

Функція інтенсивності тепловиділення в зоні горіння, що входить в рівняння (1) і (2), прийнята рівною [4]

$$\bar{q} = (\tau / \tau_m)^{3,6} \exp(-3,6\tau / \tau_m). \quad (5)$$

Тут τ_m – час максимуму тепловиділення в осередку пожежі (хв), що визначається за формулою [9]

$$\tau_m = \frac{15l_m}{u + 4}. \quad (6)$$

Площа горіння F , що входить в критерій подібності теплової енергії B , є також змінною величиною при гасінні пожежі порошком, диспергованою водою або піною. У загальному випадку площа горіння знаходиться за формулою

$$F = bl_m \left[1 - 0,5\varepsilon \left(1 + \frac{\tau - \tau_2}{|\tau - \tau_2|} \right) \right] \exp[-m\delta G(\tau - \tau_1)/(qbl_m)], \quad (7)$$

де b – ширина зони палаючої поверхні, м; G – витрата порошку або рідини при гасінні пожежі, кг/с; δ – емпірична константа; ε – частка залишку незгорілого матеріалу, що визначається за формулою

$$\varepsilon = 1 - \exp[-\delta G(\tau_2 - \tau_1)/(qbl_m)]. \quad (8)$$

Використання модуля числа у формулі (7) дозволяє також без умовних переходів безпосередньо проводити розрахунки необхідних параметрів для подальшого моделювання термо-газодинамічних процесів при пожежах.

Обробка експериментальних даних [3, 6] і лабораторних даних в камері дозволила встановити залежність числа Стантона від швидкості, рівною

$$St = \frac{14(u + 0,1)}{(u + 0,5)}. \quad (9)$$

Критерій теплоємності повітря, як встановлено, може бути прийнятий в усіх випадках за константу і дорівнює $A = 0,021$. За даними [3] при вільній вентиляції осередку пожежі, відношення швидкості горіння до швидкості надходження до осередку потоку повітря є постійною величиною, що дозволяє критерій теплової енергії пожежі визначати з достатньою мірою точності за формулою

$$B = \frac{0,016 \chi FH_c}{c_a S}. \quad (10)$$

Крім того, встановлено, що глибина прогріву навколишнього масиву r (м) залежить від часу вільного горіння осередку і дорівнює

$$\Delta r = 0,0035 \tau_m. \quad (10)$$

Виходячи з універсального підходу до процесів розвитку і гасіння пожежі різними засобами розроблені універсальна математична модель, алгоритм і програма розрахунку термо-газодинамічних параметрів за формулами (1)–(10) на ЕОМ в Excel. Адекватність розробленої математичної моделі підтверджена численними експериментальними даними в натурних і лабораторних умовах. Результати розрахунку зазначених параметрів представляються потім у розмірному чисельному вигляді в матрицях і у вигляді наочних графічних залежностей від часу концентрацій кисню і температури в зоні горіння, за якими можна судити, як про час самопогашення пожежі, так і про час її гасіння з застосуванням вибраного засоби впливу на осередок.

На рис. 1 представлено блок-схему розрахунку теплових і газодинамічних параметрів горіння і гасіння пожежі у відсіку кабельного тунелю при застосуванні різних засобів.

Як видно з блок-схеми, розрахунок теплових і газодинамічних параметрів закінчується при досягненні кількості ітерації $n = 2000$, що відповідає часу з моменту виникнення пожежі, рівної 1 – 2 год. і більше. Це залежить від величини витрати газоповітряної суміші, що надходить на осередок пожежі при швидкості її руху не менше 0,1 м/с.

Вводимо постійні вихідні дані, які зазвичай використовуються в літературі, а також прийняті вихідні дані для розрахунку в залежності від пожежного об'єкта, його параметрів, параметрів горючого матеріалу і часу з моменту виникнення пожежі.



Рисунок 1 — Блок-схема розрахунку термо-газодинамічних параметрів горіння і гасіння пожежі у відсіку кабельного тунелю

При моделюванні розвитку та гасіння пожежі з використанням алгоритму, наведеному у таблиці 1, можна вибрати конкретний засіб гасіння, вказати в Excel початок і

кінець гасіння, а також вказати режим гасіння і, проставляючи в графі проти відповідного засобу пожежогасіння «1», тут же отримати в графічному вигляді результати розрахунку, за якими можна судити про ефективність гасіння пожежі.

Таблиця 1 – Алгоритм вибору засобів пожежогасіння

Вибір засобу пожежогасіння:	
1) Рециркуляція пожежних газів (так - 1, ні - 0): підсоси повітря при рециркуляції =	0 0,10
2) Подавання пари або інертного газу (так - 1, ні -0): концентрація кисню в парогазовій суміші, С1% =	0 5
3) Подавання порошку (та -1, ні - 0): розхід порошку, Gпо (кг/с):	0 0,10
4) Подавання диспергованої води (так - 1, ні - 0): розхід води, Gв (кг/с) =	0 1,70
5) Подавання піни (так - 1; немає - 0): кратність піни, К =	1 500,00

Нижче у графічному вигляді (рис. 2 а, 2 б) наведено динаміку зміни концентрацію кисню і температури в ізолюваному відсіку тунелю при розвитку пожежі без застосування засобів пожежогасіння (тонкі лінії) і при подачі піни на основі продуктів згоряння протягом 10 хвилин.

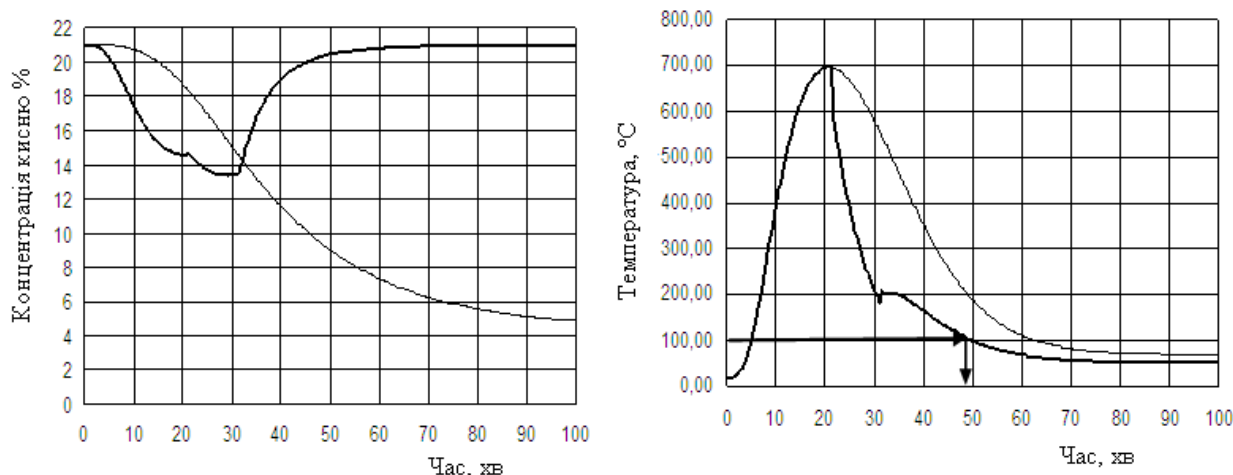


Рисунок 2 — Динаміка змінення концентрації кисню і температури в ізолюваному відсіку тунелю при розвитку пожежі без застосування засобів пожежогасіння (тонкі лінії) і при подачі піни на основі продуктів згоряння протягом 10 хвилин

При розрахунках за основу прийняті дані [1] розвитку пожежі в кабельному тунелі при довжині ізолюваного відсіку $L = 40$ м, площі поперечного перерізу відсіку $S = 2 \cdot 2 = 4$ м², максимальній температурі пожежних газів $T_m = 700$ °С; швидкість зростання температур при пожежі $T = 40$ °С/хв та пожежному навантаженні, приведену до стандартної деревини, $q = 35$ кг/м².

Аналіз отриманих результатів розрахунку показує, що піна є ефективним засобом гасіння пожеж, як на основі продуктів згоряння, так і без них. Продукти згоряння скорочують тривалість гасіння пожежі.

Як видно за даними розрахунку (рис. 2), подача диспергованої води протягом всього 10 хвилин призводить до швидкого зниження температури в осередку пожежі і вже через 9 хвилин вона досягає 200 °С, а через 20 хвилин температура зменшується до 100 °С, а концентрація кисню майже повністю відновлюється.

Висновки. Узагальнено результати математичного моделювання, які адекватні численним експериментальним даним з розвитку та гасіння пожеж різними засобами в каналах великої протяжності, створено математичну модель, яка дає можливість у разі застосування того чи іншого засобу пожежогасіння проводити розрахунки параметрів інтенсивності і тривалості впливу на осередок для його гасіння, а також дає змогу визначати кількість вогнегасних речовин.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пучков С. И. Способ тушения пожара в кабельном туннеле/ С. И. Пучков, А. А. Лебедев // Средства противопожарной защиты: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1993. – С. 49 – 61 с.
2. Ковалишин В. В. Зміна температури у відсіках кабельних тунелів у ході застосування рециркуляції продуктів горіння для гасіння пожеж / В. В.Ковалишин, С.Ю Дмитровський // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2007. – № 10. – С. 7 – 11.
3. Дмитровский С. Ю. Розрахунок витрати газоповітряної суміші в замкнутому контурі / С. Ю. Дмитровский, В. В. Ковалишин, Р. Я. Лозинський // Сб. наук. праць. – Львів: ЛПБ, 2005. – №7. – С. 135 – 140.
4. Йо Судзуки. Исследование горения электрического кабеля внутри вентиляционного канала / Судзуки Йо, Ханэ Йосинари // Касай. – 1978. -28. – 12. – С. 22 – 30.
5. 5 Моделирование воздействия на очаг пожара пены, полученной на основе продуктов горения / В. В. Ковалишин, Т. В. Бойко, И. Н. Зинченко, В. В. Мамаев // Пожарная безопасность : науч.-техн. журн. – ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. – Вып. 4. – С. 67-71.
6. Ковалишин В. В. Математична модель переносу і осадження вогнегасних порошків в каналах великої протяжності при гасінні пожеж / В. В. Ковалишин, П. С. Пашковський // Вісті Донецького гірничого інституту : Зб. наук. пр. – 2011. – №2. – С.90-96.
7. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.
8. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В. М. Астапенко, Ю. А. Кошмаров, И. С. Молчадский, А. Н. Шевляков. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.
9. Осипов С.Н. Вентиляция шахт при подземных пожарах / С.Н. Осипов, В.М. Жадан // – М.: Недра, 1972. – 150 с.

