

*В.В. Ковалишин, канд. техн. наук, доцент
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

МОДЕЛЮВАННЯ ВИНИКНЕННЯ І РОЗВИТКУ ПОЖЕЖ В ЗАКРИТИХ ОБ'ЄМАХ ВЕЛИКОЇ ПРОТЯЖНОСТІ

Запропонована математична модель розвитку пожежі з врахуванням кількості кисню, теплове джерело задане не у вигляді емпіричної залежності його у часі, але пов'язане з переміщенням у просторі. Приймаємо, що займання проходить на деякій відстані від входу. Збільшення довжини вогнища пожежі призводить до зниження кисню до 10 – 11%, після чого на 10-й хвилині концентрація кисню за вогнищем падає майже до нуля і лише на 20-й хвилині збільшується до 14 %. У той же час температура на відміну від концентрації кисню, навпаки, різко збільшується, маючи в кінці вогнища максимум, за яким спостерігається повільне зниження температури завдяки теплообміну зі стінками каналу.

Ключові слова: моделювання пожежі в закритих об'ємах, теплове джерело, концентрація кисню

Запропоновані раніше математичні моделі пожеж та динаміки температур на різних об'єктах засновані або на інтегральних, середньооб'ємних параметрах [1], або на статичних методах теплових балансів [2], або не враховують жорсткого ув'язування температури з киснем [3], а теплове джерело найчастіше задається у вигляді емпіричної залежності його від часу без переміщення в просторі [3, 4]. Остання зводить нанівець отримані результати теорії, зводячи їх до емпіризму.

Разом з тим експериментальні дані, особливо великомасштабних пожеж [1, 2, 5], свідчать про наявність жорсткого зв'язку між вмістом кисню і температурою в потоці повітря, і теплове джерело, по суті, є функцією від цих параметрів, відображаючи як процеси піролізу твердих горючих матеріалів, так і процеси горіння з переміщенням вогнища пожежі залежно від пожежного навантаження.

Тверді речовини, перейшовши в газоподібний стан і реагуючи з киснем в повітрі, утворюють продукти горіння і виділяють тепло в процесі окиснення. Утворення полум'я пов'язане з газоподібним станом речовини, тому горінню твердих речовин передуює процес хімічного розкладу речовини або піролізу.

Масова витрата продуктів піролізу пов'язана зі швидкістю його зміни [2]

$$\frac{dI}{d\tau} = -kI, \quad (1)$$

де I – витрата продуктів піролізу, кг/с; k – константа швидкості реакції при піролізі, 1/с; τ – час, с.

Розв'язком рівняння (1) при початковій умові $I(0) = I_0$ є експонентна залежність виду

$$I = I_0 \exp(-k\tau), \quad (2)$$

де $I_0 = v_0 F$ – початкова витрата продуктів піролізу, кг/с; v_0 – масова швидкість надходження продуктів піролізу у потік повітря, кг/(м²·с); $F = bl$ – площа термічного розкладу і горіння, м²; l – довжина зони термічного розкладу, м; b – ширина поверхні термічного розкладу, м.

Вступаючи у потік повітря, продукти піролізу вигоряють і виділяють тепло в одиниці об'єму $V = Sl$ залежно від кисню з інтенсивністю [2]

$$q = \chi I H_c \frac{F}{V} \frac{C}{C_0} = \chi v_0 H_c \frac{b}{S} \frac{C}{C_0} \exp(-k\tau), \quad (3)$$

де χ – коефіцієнт неповноти згоряння горючого матеріалу; H_c – теплота згоряння летких речовин, кДж/кг; C – концентрація кисню в повітрі, об. частки; C_0 – концентрація кисню в повітрі, яке надходить, приймається рівною 0,21.

Якщо врахувати ще й швидкість переміщення пожежі, то формулу (3) можна представити у вигляді

$$q = \chi \nu_0 H_c \frac{b}{S} \frac{C}{C_0} \exp[-k(w\tau - x)/u]. \quad (4)$$

Тут час пов'язано з відстанню і швидкістю руху повітря залежністю $\tau = x/u$, де w – швидкість переміщення вогнища горіння, м/с; x – поточна відстань від місця виникнення пожежі, м; u – швидкість руху повітря, м/с.

Таким чином, запропонована формула (4), на відміну від відомих емпіричних залежностей, враховує швидкість розкладання продуктів піролізу горючих матеріалів та їх спалювання з урахуванням переміщення пожежі на ділянці каналу зі змінною довжиною $x \leq w\tau$.

Функція інтенсивності тепловиділення при горінні (4) повинна включатися в рівняння конвективно-дифузійного перенесення тепла, а також в рівняння переносу кисню [6]. Ці рівняння спочатку були представлені в циліндричних координатах, а потім шляхом інтегрального усереднення за площею поперечного перерізу представлені у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} &= D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - q C_0 / (H_c \rho_k); \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} &= a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\alpha \Pi}{2 \rho c_p S} (T - \theta) + q / (\rho c_p); \end{aligned} \quad (5)$$

де D – коефіцієнт турбулентної дифузії кисню, м²/с; ρ_k – щільність кисню, кг/м³; ρ – щільність повітря, кг/м³; c_p – питома теплоємність повітря при постійному тиску, Дж/(кг·К); a_1 – коефіцієнт турбулентної температуропровідності повітря, м²/с; α_1 – коефіцієнт тепловіддачі потоку стінок каналу, Вт/(м²·К); θ – температура навколишнього масиву ґрунту, К.

Для замикання системи рівнянь (5) використано рівняння переносу тепла в ґрунті з урахуванням величин його складових і представлено у вигляді

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2}, \quad (6)$$

де a_2 – коефіцієнт температуропровідності ґрунту, м²/с; r – поперечна координата від стінок каналу вглиб масиву, м.

За крайові умови для системи рівнянь (5) і (6) взято початкові і граничні умови. Так, до виникнення пожежі температура і концентрація кисню відповідають нормальним умовам. Тому можна записати:

$$1) C(x, 0) = C_0; \quad 2) T(x, 0) = T_0; \quad 3) \theta(x, 0) = T_0. \quad (7)$$

В якості граничних умов перед осередком пожежі і за ним на досить великих відстанях прийемо ті ж умови, що й до виникнення пожежі:

$$1) C(0, \tau) = C(\infty, \tau) = C_0; \quad 2) T(0, \tau) = T(\infty, \tau) = T_0; \quad 3) \theta(0, \tau) = \theta(\infty, \tau) = T_0. \quad (8)$$

Прийемо, що піроліз горючого матеріалу починається в результаті займання на деякій відстані $x = x_1$ від входу в канал. Подальший відлік слід вести для $x_1 < x < x_2$, тобто там, де розташований горючий матеріал, як вказано на рис. 1.

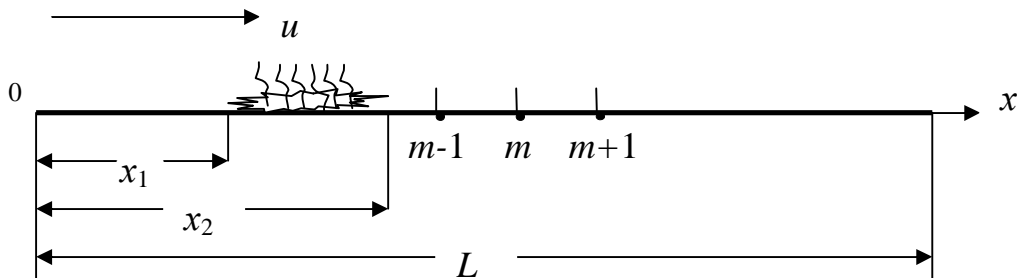


Рис. 1. Схема пожежної ділянки із зазначенням зони горіння

Для зручності моделювання введемо безрозмірні параметри концентрації кисню і температури:

$$1) \bar{C} = C/C_0; \quad 2) \bar{T} = (T - T_0)/T_0; \quad 3) \bar{\theta} = (\theta - T_0)/T_0. \quad (9)$$

Поставлену задачу розв'язуємо чисельним методом. З цією метою рівняння (5) і (6) представлені в кінцевих різницях і, з використанням явної схеми кінцевих різниць з різницями проти потоку повітря [8], шукані функції дозволені на новому часовому шарі відносного попереднього шару у вигляді

$$\begin{aligned} \bar{C}_m^{n+1} &= (Cu + \bar{D})\bar{C}_{m-1}^n + (1 - Cu - 2\bar{D})\bar{C}_m^n + \bar{D}\bar{C}_{m+1}^n - AB\bar{q}_m^n \bar{C}_m^n; \\ \bar{T}_m^{n+1} &= (Cu + \bar{a}_1)\bar{T}_{m-1}^n + (1 - Cu - 2\bar{a}_1 - St_c)\bar{T}_m^n + \bar{a}_1\bar{T}_{m+1}^n + St_c\bar{\theta}_m^n + B\bar{q}_m^n \bar{C}_m^n; \\ \bar{\theta}_m^{n+1} &= \bar{a}_2(\bar{T}_m^n - 3\bar{\theta}_m^n). \end{aligned} \quad (10)$$

Тут введено схемні числа Куранта і Стантона

$$Cu = \frac{u\Delta t}{\Delta x}; \quad St_c = \frac{\alpha\Delta t}{2\rho c_p Q}, \quad (11)$$

де Δx – крок по довжині каналу, м; Δt – крок за часом, с.

Крім того, прийняті за безрозмірні числа дифузії і температуропровідності такі співвідношення

$$\bar{D} = \frac{D\Delta\tau}{\Delta x^2}; \quad \bar{a}_1 = \frac{a_1\Delta\tau}{\Delta x^2}; \quad \bar{a}_2 = \frac{\bar{a}_2\Delta\tau}{2\Delta r^2}. \quad (12)$$

Введено також безрозмірні комплекси:

$$A = \frac{\rho c_p T_0 C_0}{\rho_k H_c} - \text{критерій теплоємності повітря і } B = \frac{\chi v_0 F H_c}{\rho c_p T_0 Q} - \text{критерій теплової енергії}$$

пожежі.

Функція джерела тепловиділення при пожежі (4) приведена до безрозмірного виду

$$\bar{q}_m^n = \exp[-K(Cu\bar{w}n - m)], \quad (13)$$

де $K = \frac{k\Delta x}{u}$ – критерій швидкості піролізу; $\bar{w} = w/u$ – відносна швидкість переміщення пожежі.

Тут джерело повинно включатися при $x = x_1$, а відключатися при $x = x_2$, що відповідають точкам m на схемі рис. 1.

Аналіз отриманої системи рівнянь (10) показує, що умовою сталого рахунку є вимога

$$Cu + 2\bar{D} + St_c < 1. \quad (14)$$

При турбулентному режимі руху можна прийняти рівними один одному коефіцієнти $Cu = 0,5$; дифузії і температуропровідності: $\bar{a}_1 = \bar{D}$ [7].

При моделюванні прийнято такі вихідні параметри: схемне число Куранта $Cu = 0,5$; схемне число Стантона $St_c = 0,1$; безрозмірні коефіцієнти дифузії і температуропровідності $\bar{D} = \bar{a}_1 = 0,1$; критерій швидкості піролізу $K = 0,1$; відносна швидкість переміщення пожежі $\bar{w} = w/u = 0,1$; критерій теплової енергії пожежі $B = 2$; критерій теплоємності повітря $A = 0,1$. При цьому допускалося, що на час розвитку пожежі стінки каналу не встигають прогрітися, тому можна прийняти $\theta = T_0$, в результаті чого третє рівняння системи (10) можна не розглядати.

Моделювання процесів теплогазообміну чисельним методом проводилося спочатку при дії зосередженого джерела горіння. На рис. 2 представлені графічні дані моделювання розподілу концентрації кисню вздовж каналу завдовжки $L = 50$ м при швидкості руху повітря $u = 0,5$ м/с з джерелом горіння, розташованого за 10 м від входу в канал.

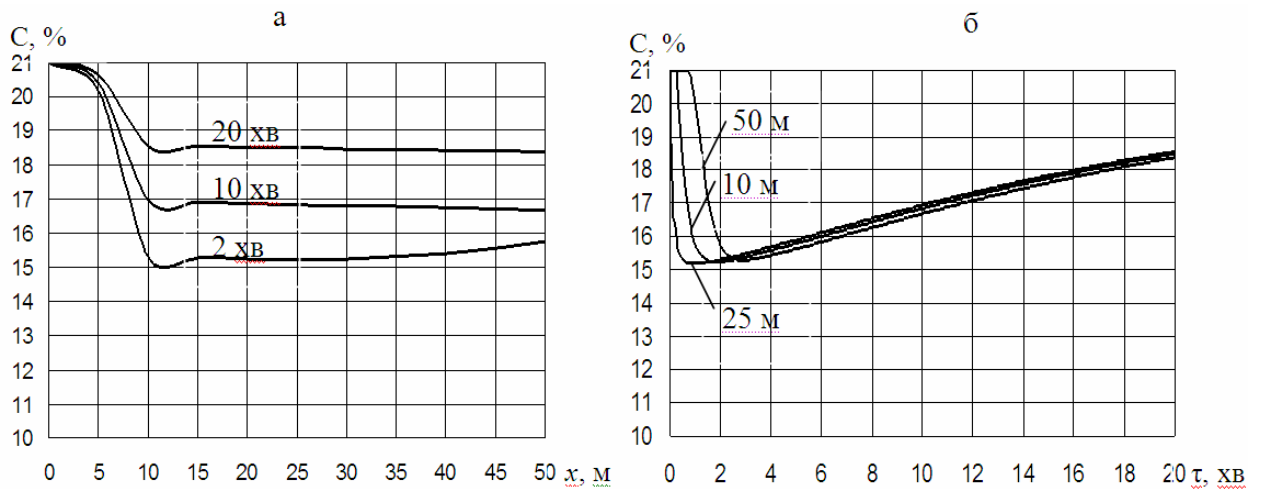


Рис. 2. Розподіл концентрацій кисню вздовж каналу (а) і в часі (б) з моменту займання при зосередженому джерелі горіння

Аналіз даних моделювання показує, що при зосередженому джерелі горіння в місці його розташування концентрація кисню різко знижується до 15% і за джерелом майже не змінюється. З часом концентрація кисню збільшується, що свідчить про зменшення інтенсивності горіння (рис. 2 а).

На рис. 2 б показано, як змінюється з часом концентрація кисню в різних перетинах, різко падаючи спочатку і потім повільно наближаючись до свого початкового рівня.

Зміна в часі концентрації кисню показана на різних відстанях від входу в канал (1 - 10 м, 2 - 25 м, 3 - 50 м) при зосередженому джерелі горіння.

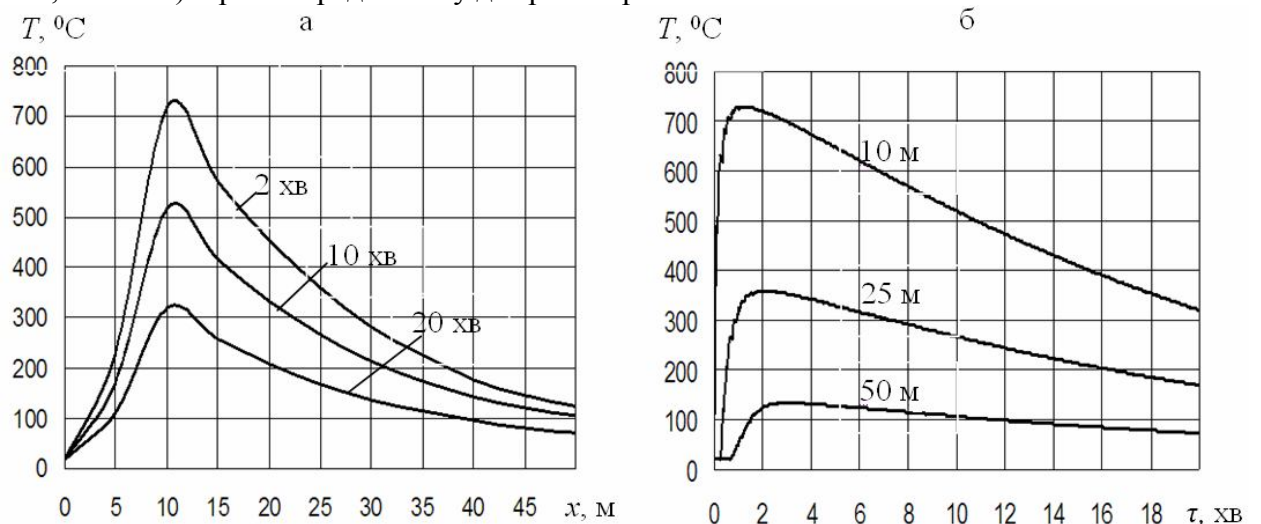


Рис. 3. Результати моделювання розподілу температури вздовж каналу (а) і в часі (б) при зосередженому джерелі горіння з моменту займання

Як показують дані моделювання (рис. 3а) у місці виникнення джерела горіння температура різко зростає, а потім повільно знижується. Таке ж спостерігається і за осередком пожежі, але з деяким запізненням і з дедалі меншим максимумом температури.

На рис. 3,б представлені результати моделювання зміни температури в часі на різних відстанях від зосередженого джерела горіння, звідки видно зменшення максимуму температури та її запізнення з віддаленням від вогнища пожежі.

Результати моделювання чисельним методом показали, що високі температури 100 – 200 °С спостерігаються (рис. 3 а) навіть за 5 м від вогнища пожежі, що не суперечить експериментальним даним [5]. Це пояснюється кондуктивною передачею тепла спільно з променистим теплообміном проти потоку повітря.

Ще одна серія чисельних експериментів в математичній моделі проведена при розосередженому джерелі горіння з повільною швидкістю переміщення вогнища пожежі $w = 0,05$ м/с. Моделювання проводилося при тих самих вихідних параметрах за винятком критерію теплової енергії пожежі, який в цьому випадку був прийнятий трохи меншим і рівним $B = 1,5$. На рис. 4 показано розподіл концентрацій кисню вздовж каналу при розосередженому джерелі горіння з максимальною довжиною його 10 м.

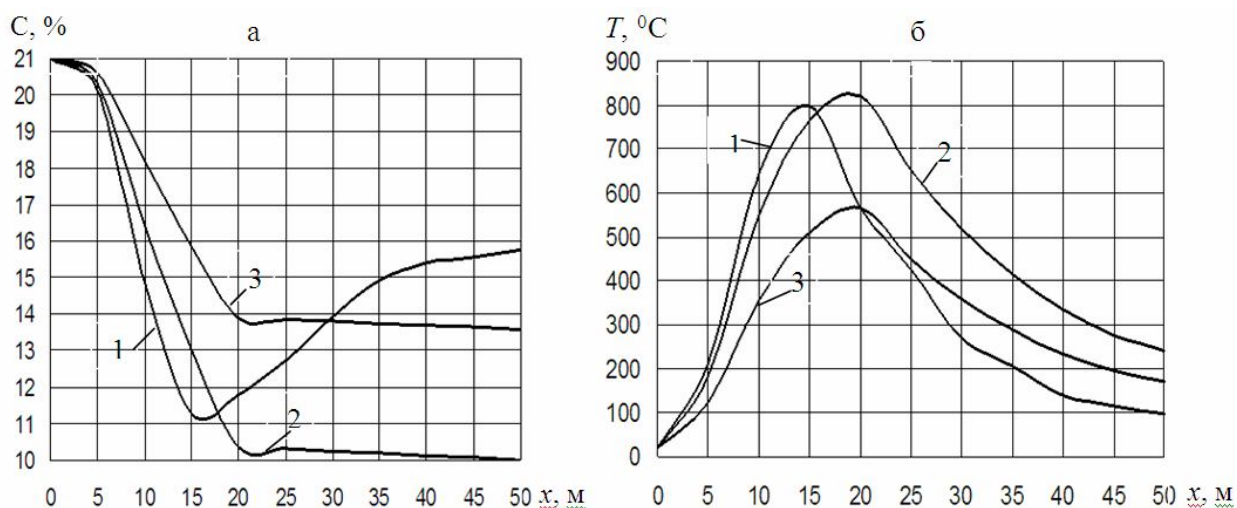


Рис. 4. Розподіл концентрацій кисню (а) і температури (б) уздовж каналу при розосередженому джерелі горіння на довжині 10 м в різний час з моменту займання (1 – 2 хв, 2 – 10 хв, 3 – 20 хв)

Як видно (рис. 4 а), збільшення довжини вогнища пожежі призводить до зниження кисню до 10 – 11%, після чого на 10-й хвилині концентрація кисню за вогнищем зменшується майже до нуля і лише на 20-й хвилині збільшується до 14 %.

У той же час температура на відміну від концентрації кисню, навпаки, різко збільшується (рис. 4 б), маючи в кінці вогнища максимум, за яким спостерігається повільне зниження температури завдяки теплообміну зі стінками каналу.

Порівнюючи рис. 3 а з рис. 4 б приходимо до висновку, що чим ширша зона горіння, тим більш похилі криві температури і ширша ділянка каналу з високими температурами.

Отже, отримані результати моделювання пожеж чисельним методом правильно відображають процеси, які при цьому відбуваються з урахуванням взаємозв'язку температури з концентрацією кисню і з переміщенням фронту горіння при піролізі горючих матеріалів, що знаходиться в повній відповідності з фізикою цього явища.

Список літератури:

1. **Термогазодинамика** пожаров в помещениях / В.М. Астапенко, Ю.А. Кошмаров, И.С. Молчадский, А.Н. Шевляков. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.
2. **Драйздейл Д.** Введение в динамику пожаров / Д. Драйздейл. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.

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

4. **Бондарев В.Ф.** Определение интенсивности тепловыделения при пожаре подвижного состава метрополитена в тоннеле / В. Ф. Бондарев, А. А. Лесков // Борьба с пожарами в метрополитене. Сб. науч. трудов. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1992. – С. 62-72.

5. **Осипов С. Н.** Вентиляция шахт при подземных пожарах / С. Н. Осипов, В.М. Жадан. – М.: Недра, 1972. – 150 с.

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

7. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 904 с.

8. **Патанкар С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкостей / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 150 с.

В.В. Ковальшин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ПОЖАРОВ В ЗАКРЫТЫХ ОБЪЕМАХ БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ

Предложена математическая модель развития пожара с учетом количества кислорода, источник тепла задан не в виде эмпирической зависимости во времени, а связан с перемещением в пространстве. Принимаем, что возгорание происходит на некотором расстоянии от входа. Увеличение длины очага пожара приводит к снижению концентрации кислорода до 10 – 11%, после чего на 10-й минуте концентрация кислорода за очагом падает почти к нулю и лишь на 20-й минуте увеличивается до 14%. В то же время температура, в отличие от концентрации кислорода, наоборот, резко увеличивается, имея в конце очага максимум, по которому наблюдается медленное снижение температуры благодаря теплообмену со стенками канала.

Ключевые слова: моделирование пожара в закрытых объемах, тепловой источник, концентрация кислорода

V.V. Kovalyshyn

MODELLING OF THE START AND DEVELOPMENT OF FIRES IN CLOSED VOLUMES OF GREAT LENGTH

The mathematical model of fire development in view of oxygen amount is represented. Heat-source is not given in the form of an empirical dependence of time, but is concerned with moving in space. We accept that fire begins in some distance from the entrance. Increasing of the fire size leads to reduction of oxygen to 10 – 11%. By a 10-minute period concentration of oxygen falls almost to zero and only at 20th minute increases to 14%. At the same time the temperature in contrast the oxygen concentration, on the contrary, sharply increases, with a maximum at the end of the fire, then there is a slow decrease in temperature by heat exchange with the walls of the channel.

Key words: fire simulation in a closed volume, the heat source, the concentration of oxygen

