

В.В. Ковалишин, д-р техн. наук, доцент, В.М. Ковальчик, Т.Б. Юзьків, канд. техн. наук, доцент, (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ТА ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ В КАНАЛАХ ІНЕРТНИМИ ГАЗАМИ З НАСТУПНОЮ ЇХ РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ

Розроблена математична модель розвитку та гасіння пожежі в каналах інертними газами з подальшою їх рециркуляцією. Враховано стиснення газів від температури за межами осередку пожежі, що не враховувалося попередніми дослідниками. Виконано чисельне моделювання гасіння пожежі інертними газами протягом деякого часу без рециркуляції та з наступною рециркуляцією. Наглядне представлення результатів моделювання дає повну уяву про ефективність гасіння пожежі інертними газами та дає змогу прогнозувати час гасіння пожежі.

Ключові слова: канал, пожежа, гасіння, інертні гази, рециркуляція, температура, кисень, чисельний метод, моделювання, прогноз.

Для чисельного моделювання гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією в каналах використовуємо зональну модель [1], розглядаючи дві зони: перед осередком горіння та в осередку горіння. Це спрощує задачу і дозволяє розглядати процеси тепло-масообміну тільки в часі в кожній зоні.

Для опису процесів розвитку і гасіння пожеж в каналах використовуємо рівняння збереження енергії та збереження маси кисню з врахуванням теплообміну зі стінками каналу [1, 2]:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q, \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - M, \quad (2)$$

де ρ – густина газів, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_p – питома теплоємність газів при постійному тиску, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; u – швидкість повітря вздовж каналу, $\text{м}/\text{с}$; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – коефіцієнти теплопровідності вздовж відповідних напрямків, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; T – температура, К ; q – інтенсивність внутрішнього джерела тепла при горінні, $\text{Вт}/\text{м}^2$; C – концентрація кисню відносна; D_x, D_y, D_z – коефіцієнти турбулентної дифузії кисню в напрямку відповідних координат, $\text{м}^2/\text{с}$; x – координата вздовж каналу, м ; y і z – відповідно поперечна та вертикальна координати, м ; M – інтенсивність джерела поглинання кисню при горінні, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^3)$.

Представимо другі похідні по поперечних координатах в кінцевих різниціях та, приймаючи однакові кроки $\Delta y = \Delta z$, отримаємо

$$\frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial T}{\partial x} = a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 16a_y \frac{T_{\text{ст}} - T}{S} + \frac{q}{\rho_0 c_p}. \quad (3)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial C}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial C}{\partial x} = \tilde{D}_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + 16\tilde{D}_y \frac{C_0 - C}{S} - M / \rho_0. \quad (4)$$

де ρ_0 – середня густина газів, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\tilde{u} = \rho u / \rho_0$ – приведена масова швидкість газів вздовж каналу, $\text{м}/\text{с}$; $a_x = \lambda / (\rho_0 c_p)$ – коефіцієнт температуропровідності вздовж потоку газів, $\text{м}^2/\text{с}$; $a_y = \lambda / (\rho_0 c_p)$ – коефіцієнт температуропровідності в напрямку до стінок каналу, $\text{м}^2/\text{с}$; $\tilde{D}_y = \rho D_y / \rho_0$ – приведений коефіцієнт дифузії до стінок каналу, $\text{м}^2/\text{с}$; $T_{\text{ст}}$ – температура на стінках каналу, К .

Введення масової швидкості дозволяє врахувати стиснення газів та враховувати її при цьому за константу в рівняннях (3) та (4). При цьому, якщо швидкість буде збільшуватися, то густина буде зменшуватися, але масова швидкість залишиться постійною.

При дозвукових потоках газів тиск змінюється незначно, на декілька десятків або сотень Паскаль, що по відношенню до атмосферного тиску, який становить $P_0 = 10^5$ Па, ці коливання є дуже незначними. Рівняння стану газів можна представити у вигляді

$$\rho / \rho_0 = T_0 / T. \quad (5)$$

Враховуючи рівняння стану газів (5), представимо систему рівнянь (3) та (4) у вигляді

$$\frac{1}{\bar{T}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = a_x \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + 16a_y \frac{\bar{T}_{\text{ст}} - \bar{T}}{S} + \frac{q}{\rho_0 c_p T_0}; \quad (6)$$

$$\frac{1}{\bar{T}} \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = \tilde{D}_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + 16\tilde{D}_y \frac{1 - \bar{C}}{S} - M / (\rho_0 C_0). \quad (7)$$

Тут параметри $\bar{T} = T / T_0$, $\bar{T}_{\text{ст}} = T_{\text{ст}} / T_0$ та $\bar{C} = C / C_0$ означають безрозмірні температуру та концентрацію кисню. Складові системи рівнянь (6,7) функції джерел виділення теплоти та поглинання концентрації кисню являються невідомими та вимагають подальшого визначення.

При довгих процесах горіння необхідно враховувати додатково нагрівання стінок каналу з наступним їх охолодженням. Через це необхідно додати також рівняння нагріву порід навколо каналу [2]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}, \quad (8)$$

де θ – температура навколишніх порід, К; a – коефіцієнт температуропровідності порід, $\text{м}^2/\text{с}$.

Систему рівнянь (6) – (8) будемо розв'язувати чисельно в кінцевих різницях. В цьому випадку рівняння (8), обмежуючись тільки одним елементом розбиття, прийме вигляд

$$\bar{\theta}^{n+1} = \frac{\bar{\theta}^n + \bar{a}(\bar{T}^n + 2)}{1 + 3\bar{a}}, \quad (9)$$

де $\bar{a} = \frac{a\Delta\tau}{2\Delta y^2}$ – безрозмірний коефіцієнт температуропровідності навколишнього масиву, $\Delta\tau$ – крок за часом, с; n – номер кроку за часом.

Формула для розрахунку температури на стінках каналу

$$\bar{\theta}_{\text{ст}} = (\bar{\theta} + \bar{T}) / 2. \quad (10)$$

До рівняння (10), нехтуючи температуропровідністю та поздовжньою дифузією в порівнянні з напірним рухом газів, додамо рівняння (6) в кінцевих різницях

$$\bar{T}^{n+1} = \bar{T}^n \frac{1 + \text{Cu} + \bar{\gamma}_1 \bar{\theta}^n + \bar{q}^n \bar{C}^n}{1 + \bar{T}^n (\text{Cu} + \bar{\gamma}_1)}, \quad (11)$$

де $\text{Cu} = \tilde{u}\Delta\tau / \Delta x_2$ – схематичне число Куранта; $\bar{\gamma}_1 = 8a_y\Delta\tau / S$ – безрозмірний коефіцієнт теплообміну зі стінками каналу в зоні горіння; $\bar{q}^n = \frac{q^n}{\rho_0 c_p T_0}$ – відносна інтенсивність тепловиділення в зоні горіння; Δx_2 – довжина зони горіння, м.

Аналогічно, нехтуючи дифузією газів в порівнянні з напірним їх рухом, представимо рівняння переносу кисню (7) перед зоною горіння та в зоні горіння в кінцевих різницях

$$\bar{\zeta}^{n+1} = \frac{\bar{\zeta}^n + \bar{\zeta}_0^{n+1} Cu \Delta x_2 / \Delta x_1 + \bar{\gamma}_2}{1 + Cu \Delta x_2 / \Delta x_1 + \bar{\gamma}_2}, \quad (12)$$

$$\bar{C}^{n+1} = \frac{\bar{C}^n + \bar{T}^n (Cu \bar{\zeta}^{n+1} + \bar{\gamma}_2)}{1 + \bar{T}^n (Cu + \bar{\gamma}_2 + \delta \bar{q}^n)}, \quad (13)$$

де $\bar{\zeta}$ та \bar{C} – відносна концентрація кисню в першій і другій зонах; $\bar{\gamma}_2 = 16D_y \Delta \tau / S$ – безрозмірний коефіцієнт поглинання інертного газу; δ – коефіцієнт витрати кисню на хімічні реакції з газоподібними продуктами піролізу.

З формули (13) випливає, що при відсутності хімічних реакцій ($\delta = 0$) концентрація кисню в зоні горіння не буде змінюватися.

Таким чином, отримано чотири рівняння (9), (11) – (13) для дослідження гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією в закритому контурі. Аналіз системи цих рівнянь показує, що вона абсолютно стійка, так як не має в чисельнику доданків зі знаком «мінус».

Джерело тепловиділення при горінні представимо в аналітичному вигляді:

$$\bar{q}^n = \bar{q}_0 kn \Delta \tau \exp(-kn \Delta \tau), \quad (14)$$

де \bar{q}_0 – відносно максимальне тепловиділення при пожежі; $k = 2/\tau_m$ як швидкість розвитку та гасіння пожежі, 1/с.

Коефіцієнт теплообміну $\bar{\gamma}_1$ та коефіцієнт поглинання $\bar{\gamma}_2$ інертного газу стінками каналу приймаються за даними експериментальних досліджень.

Початковою умовою перед виникненням пожежі для системи рівнянь (9), (11) – (13) приймемо

$$\bar{\zeta}^0 = \bar{C}^0 = \bar{T}^0 = \bar{\theta}^0 = 1. \quad (15)$$

Для концентрації кисню гранична умова при подачі інертного газу перед зоною горіння має такий вигляд:

$$\bar{\zeta}_0^{n+1} = 1 + 0,25 \left(1 + \frac{n - n_2}{|n - n_2|} \right) \left(1 + \frac{n_3 - n}{|n_3 - n|} \right) (\bar{C}^n - 1). \quad (16)$$

Аналіз отриманої формули (16) показує, що після подачі інертного газу та створення замкнутого контуру кисень відповідної концентрації на виході із зони горіння буде попадати на вхід в першу зону до того часу, поки $n < n_3$. Потрібно розімкнути контур і на вхід в першу зону почне поступати свіже повітря з нормальною концентрацією кисню, рівною «1».

Наведених вище рівнянь, формул та умов повністю достатньо для моделювання гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією в довгих каналах.

Розроблені алгоритм та програмне забезпечення для розрахунку динаміки за часом температури в зоні горіння і на стінках каналу, а також концентрації кисню в зоні горіння та перед нею. При розрахунках формуються чотири масиви розрахункових даних температури і концентрації кисню з показом кривих їх розподілу за часом.

Дія на осередок пожежі в цьому випадку полягає в тому, що з однієї сторони пожежні гази, котрі відбираються з ізолюваної ділянки, повертаються по трубопроводах до осередку горіння. Ефективність застосування інертного газу з наступною їх рециркуляцією в основному визначається двома параметрами: відстанню до осередку пожежі та відстанню, з якої можна здійснити забір продуктів горіння та подати до осередку пожежі.

Схема організації впливу інертних газів на осередок пожежі в ізолюваному об'ємі показана на рис.1.

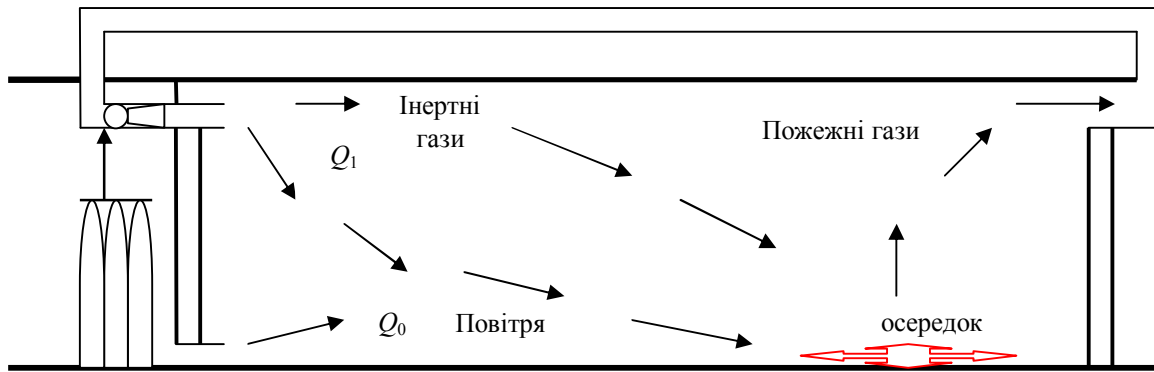


Рис.1. Схема організації дії інертних газів на осередок пожежі в ізольованому об'ємі

З рис. 1 видно, що з балонів або з установки мембранного отримання азоту інертні гази подаються в ізольований відсік кабельного тунелю, де змішуючись з повітрям, поступають до осередку горіння, а пожежні гази (леткі продукти згорання, що виділяються під час пожежі), подаються по трубопроводу знову в ізольований відсік.

Згідно з розробленою зонною моделлю на рис.2 представлені результати моделювання динаміки за часом температури та концентрації кисню при пожежі.

Моделювання проводилось при таких вихідних даних: $Cu = 1$; $\bar{\gamma}_1 = 1$; $\bar{\gamma}_2 = 0$; $k = 0,0004$ 1/с; $n_0 = 24$; $\delta = 0,15$; $\bar{a} = 0,007$; $\bar{q}_0 = 8$.

Результати моделювання показують, яке велике значення має врахування нагрівання та охолодження навколишнього масиву, в тому числі і твердого палива. На рис. 2 видно, що нагрівання стінок каналу починається із запізненням, а охолодження - із сповільненням. Тут максимум температури в зоні горіння співпадає з мінімумом концентрації кисню.

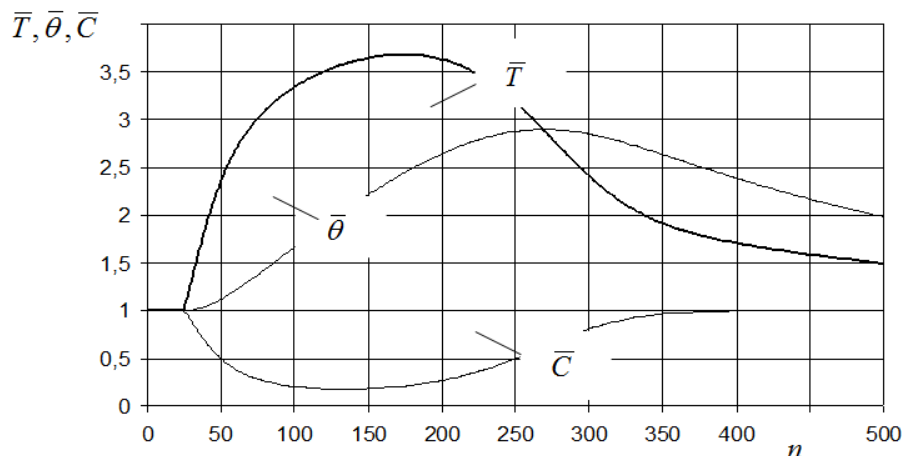


Рис. 2. Динаміка за часом відносної температури в зоні горіння і на стінках каналу та відносної концентрації кисню в зоні горіння

Перейшовши до реального масштабу часу і розмірних величин температури і концентрації кисню, приймемо, що довжина зони горіння $\Delta x_2 = 10$ м, а вся довжина відсіку каналу $L = 150$ м. Тоді довжина зони до осередку горіння буде становити

$\Delta x_1 = 140$ м. При швидкості повітря $u = 1$ м/с і числі Куранта $Cu = 1$, крок за часом буде дорівнювати $\Delta \tau = 0,017$ хв.

На рис.3 показана крива зміни температури за часом в зоні горіння відповідної до вибраних вихідних даних.

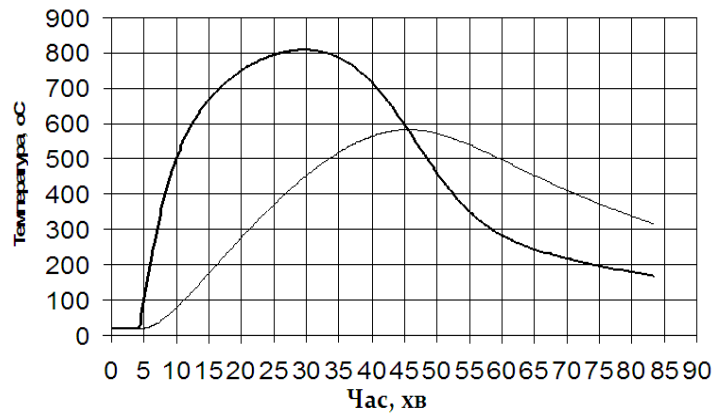


Рис.3. Динаміка температури в зоні горіння довжиною 10 м (товста лінія) і на стінках каналу (тонка лінія) при швидкості повітря 1 м/с

Отримані результати відповідають даним [3], коли через 30 хвилин температура досягне 800 °С. Час розпалювання при цьому було прийнято рівним $\tau_0 = 4$ хв.

Для розрахунку довжини зони горіння в цьому випадку представлена формула [3]

$$\Delta x_2 = \tau(u + 4)/15. \quad (17)$$

Підставляючи в формулу (17) час $\tau = 30$ хв, отримаємо довжину зони горіння, яка дорівнює $\Delta x_2 = 10$ м.

Моделювання гасіння пожежі чисельним методом проводилось шляхом подачі протягом певного часу інертного газу з подальшою рециркуляцією пожежних газів в замкнутому контурі.

На рис. 4 представлені результати моделювання гасіння пожежі інертним газом протягом 10 хв без наступної рециркуляції.

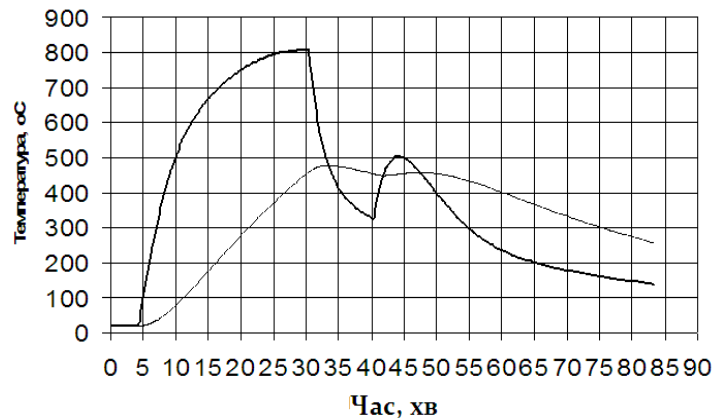


Рис. 4. Динаміка температури в зоні горіння (товста лінія) і на стінках каналу (тонка лінія) при гасінні пожежі інертним газом

Як видно (рис. 4), подача інертного газу з концентрацією кисню 4% через 30 хвилин з моменту виникнення пожежі призвела до різкого зниження температури з 800 °С до 300 °С за 10 хвилин. Припинення подачі інертного газу призвело до подальшого горіння та різкого збільшення температури до 500 °С. Порівняння даних, представлених на рис. 3 і рис. 4 показує, що зниження температури в зоні горіння до 200 °С при подачі інертного газу проходить всього на 10 хвилин швидше, що свідчить про малу ефективність гасіння пожежі за короткий час.

На рис. 5 представлені результати моделювання динаміки концентрації кисню при подачі інертного газу.

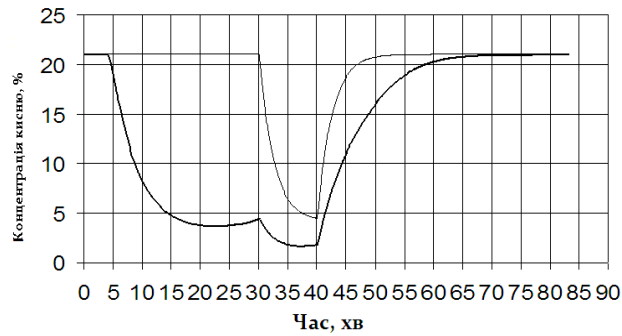


Рис. 5. Динаміка концентрації кисню в зоні горіння (товста лінія) та перед нею (тонка лінія) при гасінні пожежі інертним газом

Як видно (рис. 5), при подачі інертного газу концентрація кисню і перед зоною горіння, і в зоні горіння різко знижується, а потім швидко поновлюється, що також свідчить про низьку ефективність гасіння пожежі за короткий період.

На рис. 6 представлені результати моделювання гасіння пожежі інертним газом з наступною рециркуляцією продуктів горіння.

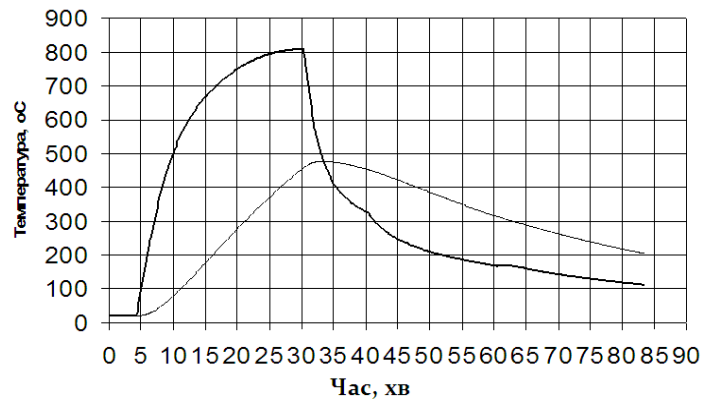


Рис. 6. Динаміка температури в зоні горіння (товста лінія) і на стінках каналу (тонка лінія) при гасінні пожежі інертним газом з наступною рециркуляцією пожежних газів

Як видно (рис.6), наступна рециркуляція пожежних газів протягом 20 хвилин після подачі інертного газу протягом 10 хвилин призвела до суттєвого зниження температури та вже на 80-й хвилині з моменту виникнення пожежі температура в зоні горіння знизилась до 100⁰С. В той же час охолодження стінок каналу згідно з даними (рис. 4 і рис. 6), майже не залежить від режиму гасіння пожежі. Так, температура на стінці каналу знизилась на 80-й хвилині з 300⁰С всього до 200⁰С.

На рис. 7 представлені криві зміни за часом концентрацій кисню, як перед осередком пожежі, так і в зоні горіння при подачі інертного газу з наступною їх рециркуляцією.

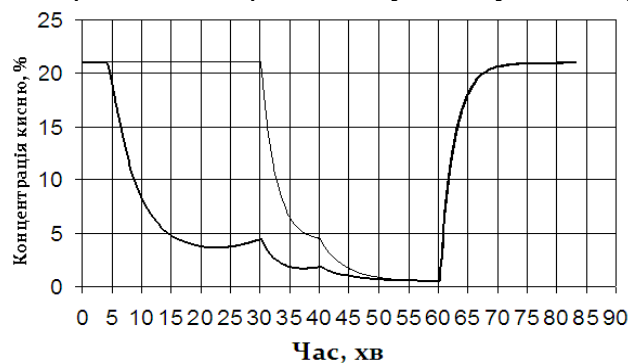


Рис. 7. Динаміка концентрації кисню в зоні горіння (товста лінія) і перед нею (тонка лінія) при гасінні пожежі інертним газом з наступною їх рециркуляцією

Висновки. Як видно (рис. 7), додаткова рециркуляція пожежних газів протягом 20 хвилин призвела до ще більшого зниження концентрації кисню як в зоні горіння, так і перед нею, що зумовило значний вплив на ефективність гасіння пожежі.

Таким чином, чисельне моделювання гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією дає можливість науково обґрунтувати параметри ефективного гасіння.

Список літератури:

1. Пузач С. В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
2. Лыков А. В. Тепломассообмен: справочник. – М.: Энергия, 1980. – 580 с.
3. Осипов С.Н. Вентиляция шахт при подземных пожарах / С.Н. Осипов, В.М. Жадан. – М.: Недра, 1973. – 152 с.

В.В. Ковалишин, В.М. Ковальчик, Т.Б. Юзькив

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОЗВИТТЯ И ТУШЕННЯ ПОЖАРА В КАНАЛАХ ІНЕРТНЫМИ ГАЗАМИ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ІХ РЕЦИРКУЛЯЦІЕЙ

Разработана математическая модель развития и тушения пожара в каналах инертными газами с последующей их рециркуляцией. Учтена, ранее не принимавшаяся во внимание, сжимаемость газов от температуры за пределами очага пожара. Выполнено численное моделирование тушения пожара инертным газом в течение некоторого времени без рециркуляции и с последующей рециркуляцией. Наглядное представление результатов моделирования даёт полное представление об эффективности тушения пожара инертными газами и позволяет дать прогноз времени тушения пожара.

Ключевые слова: канал, пожар, окружающий массив, тушение, инертные газы, рециркуляция, температура, кислород, численный метод, моделирование, прогноз

V.V. Kovalyshyn, V.M.Kovalchuk, T.B.Yuz'kiv

THE MODELING OF FIRE GROWTH AND FIRE SUPPRESSION WITH HELP OF INERT GASES WITH SUBSEQUENT RECIRCULATION

The model of fire growth and fire extinguishment in channels with the help of inert gases with subsequent recycling was designed. Gas compression in high temperatures outside the fire bed not taken into account by previous researchers, was taken into consideration in present research. Numerical modeling of fire extinguishment with the help of inert gases within some time without recirculation and with subsequent recycling was completed. The pictorial demonstration of modeling results provides a complete picture of the effectiveness of fire-extinguishing with help of inert gases and helps estimate the time needed to extinguish the fire.

Key words: channel, fire suppression, inert gases, recycling, temperature, oxygen, numerical methods, modeling, prediction.

