

УДК 622 82: 614. 842

*В.М. Ковальчик, В.В. Ковалишин, д-р техн. наук, доц.***МОДЕЛЮВАННЯ ЧИСЛОВИМ МЕТОДОМ ПОДАВАННЯ ІНЕРТНОГО ГАЗУ ДО ОСЕРЕДКУ ПОЖЕЖІ НА ЗНАЧНІ ВІДСТАНІ**

Розроблено числовий метод моделювання подавання інертного газу до осередку пожежі на значні відстані. Облік поглинання інертного газу, особливо діоксиду вуглецю, показав, що на великих відстанях, де може знаходитися осередок пожежі, даний спосіб його гасіння може бути неефективним. Адекватність отриманих розрахунків підтверджено результатами експериментальних досліджень.

Ключові слова: пожежа, інертні гази, гасіння діоксидом вуглецю, моделювання подачі інертного газу.

*V. Kowalchuk, V. Kovalyshyn, Doc. of Sc. (Eng.), Docent***NUMERICAL METHOD OF MODELING OF INERT GAS FEEDING TO THE FIRE SOURCE AT THE LONG-DISTANCE**

The article illustrates the developed numerical method of modeling of inert gas feeding to the fire source at the long-distance. The calculation of inert gas absorption, particularly carbon dioxide, has shown that this method of extinguishment may not be effective at the long-distances which may hold the source of fire. Correctness of the obtained calculations is confirmed by the results of experimental researches.

Keywords: fire, inert gases, carbon dioxide extinguishing, modeling of inert gas feeding.

Значна протяжність кабельних тунелів не дозволяє ефективно загасити осередок пожежі різними засобами, в тому числі інертними газами, якщо зона горіння розміщена далеко від місця їх подавання. Так, за даними [1] загальна довжина кабельних тунелів може складати десятки кілометрів. При цьому відсіки, розділені протипожежними перегородками, мають довжину 150 м з площею поперечного перерізу до 4 м². Якщо врахувати, що інертний газ, що заповнює такий відсік з протилежної сторони від осередку пожежі, повинен пройти цю відстань і частково поглинутися стінками каналу. Тому необхідно знати, коли газова вогнегасна речовина заповнить зону горіння та з якою концентрацією.

Є дані аналітичних та експериментальних досліджень заповнення азотом та вуглекислим газом гірничих виробок [2, 3]. Однак, отримані аналітичні дослідження в цих роботах дуже складні та відносяться до вузького кола задач, наприклад, тільки при постійній подачі інертного газу. Однак, на практиці подача може бути не постійною, а хвилеобразною, яку неможливо описати аналітично. Тому пропонується простий числовий метод вирішення задачі динаміки концентрацій інертних газів в довгих каналах.

Для описання цього процесу використовуємо рівняння для одномірного потоку газів у вигляді [4]

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uZ)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \gamma(Z_0 - Z), \quad (1)$$

де Z – концентрація інертного газу, %; t – час з моменту подачі інертного газу в канал, с; u – швидкість газоповітряної суміші, направлена вздовж каналу, м/с; x – координата вздовж осі каналу, м; D_x – коефіцієнт турбулентної дифузії інертного газу, м²/с; γ – коефіцієнт поглинання інертного газу стінками каналу, 1/с.

Початкову умову для рівняння (1) представимо у вигляді

$$Z(x,0) = Z_0. \quad (2)$$

Таким чином, приймаємо, що концентрація інертного газу до пожежі була всюди однаковою та рівною, для азоту, $Z_0 = 79 \%$, а якщо для діоксиду вуглецю, то можна приймати $Z_0 = 0$.

На лівій та правій межах потоку газу приймаємо

$$1) Z(0,t) = Z_1(t); \quad 2) \frac{\partial Z(L,t)}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

де $Z_1(t)$ – довільно змінна у часі функція в залежності від інтенсивності подачі інертного газу, %; L – довжина каналу, м.

Існує декілька складних аналітичних рішень рівняння (1) в циліндричних координатах при постійній подачі інертного газу та при змінній по експоненті за його подачею.

Однак, численне рішення рівняння (1) з початковим та граничними умовами (2) і (3) надає великі можливості вивчення закономірностей заповнення каналу інертним газом при постійній або його подачі з перервами.

Для отримання численного рішення задачі представимо рівняння (1) в кінцевих центральних різницях проти потоку [5]:

$$Z_m^{n+1} = Z_m^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} [(uZ)_{m-1}^n - (uZ)_m^n] + \frac{D_x \Delta t}{\Delta x^2} (Z_{m-1}^n - 2Z_m^n + Z_{m+1}^n) - \gamma \Delta t Z_m^n, \quad (4)$$

де Δt – крок за часом, с; m – номер вузла на вісі координат x ; n – номер часового шару.

Прийнявши швидкість газоповітряної суміші постійною, представимо отримане рівняння (4) в критеріальному вигляді

$$Z_m^{n+1} = Z_m^n + (Cu + Fo)Z_{m-1}^n + (1 - Cu - 2Fo - \bar{\gamma})Z_m^n + FoZ_{m+1}^n, \quad (5)$$

де $Cu = u\Delta t / \Delta x$ – критерій моделювання Куранта; $Fo = D_x \Delta t / \Delta x^2$ – дифузійний критерій Фур'є; $\bar{\gamma} = \gamma \Delta t$ – безрозмірний параметр інтенсивності поглинання газів стінками каналу.

Очевидно, для стійкого рахунку необхідно вимагати, щоб

$$Cu + 2Fo + \bar{\gamma} < 1. \quad (6)$$

Вибравши кроки по довжині каналу та по часу і дотримуючись умови стійкості розв'язку (6), початкова умова (2) при $n = 0$ представимо у всіх точках від $m = 0$ до $m = M$ у вигляді $Z_m^0 = Z_0$.

Граничні умови (3) в початковому вузлі $m = 0$ і на виході з каналу при $m = M$ представимо в кінцевих різницях

$$1) Z_0^{n+1} = Z_1(n\Delta t); \quad 2) Z_M^{n+1} = Z_{M-1}^{n+1}. \quad (7)$$

Таким чином, розроблена математична модель нестационарного переносу інертного газу в каналах великої протяжності дозволяє дослідити усі закономірності заповнення ізолюваних або неізолюваних об'ємів інертними газами при постійній або перервній подачі з будь-яким проміжком за часом.

Прийmemo при моделюванні, що подача інертного газу в канал постійна на деякому проміжку часу, а критерії схожості рівні $Cu = 0,5$; $Fo = 0,15$; $\bar{\gamma} = 0,01$.

На рис.1 представлені результати розрахунку за формулою (5) розподілу безрозмірної концентрації інертного газу вздовж каналу в різний час з моменту його подачі.

Як видно (рис. 1), з проходженням часу канал все більше заповнюється інертним газом та через 50 кроків за часом відбувається його повне заповнення.

Поглинання інертного газу різко міняє картину заповнення. Так, навіть при значенні безрозмірного параметру інтенсивності поглинання газів $\bar{\gamma} = 0,01$, вдається заповнити віддалену частину каналу тільки на 70 %.

Як показують результати моделювання, подальша подача інертного газу не призводить до зміщення штрихової лінії (рис. 1), і вона залишається на місці, що вказує на ефект поглинання стінками інертного газу.

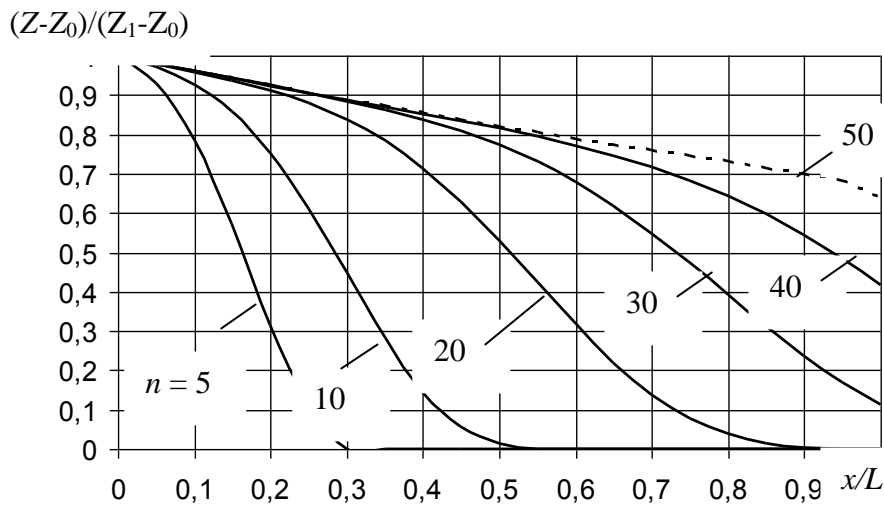


Рисунок 1 — Розподіл безрозмірної концентрації інертного газу по довжині каналу в різний час з моменту його подачі без поглинання (штрихова лінія означає кінець подавання інертного газу)

У стаціонарному випадку ($t \rightarrow \infty$) при тривалій подачі інертного газу рішення рівняння (1) прийме вигляд:

$$Z(x) = Z_0 + (Z_1 - Z_0) \exp\left(-\frac{2\gamma x}{u + \sqrt{u^2 + 4\gamma D_x}}\right). \quad (7)$$

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі натурному об'єкту використані експериментальні дані [3], отримані при заповненні вуглекислим газом (CO_2) ізольованих гірничих виробок, коли його концентрація не відразу досягає своєї межі, а відбувається спочатку заповнення деякого об'єму за експоненціальною залежністю

$$Z(0, t) = Z_1 - (Z_1 - Z_0) \exp(-n\Delta t). \quad (8)$$

Експерименти з інертизації ізольованих об'ємів вуглекислим газом (CO_2) проводились як в штольні ВНДІГС «Респіратор», так і в шахтних умовах на виямочних дільницях [3]. Так, в шахтних умовах експерименти проводились при початковій концентрації вуглекислого газу від 17% до 81%. Швидкість потоку суміші газів складала 0,2 – 0,5 м/с, а її розхід знаходився в межах 1,2 – 3 м³/с. При цьому розхід CO_2 складав 0,2 – 1,5 м³/с.

На рис. 2 показані розрахункові (криві лінії) і експериментальні дані інертизації вуглекислим газом ізольованого об'єму.

При розрахунках прийнято: $\Delta x = 12$ м; $\Delta t = 15$ с; $u = 0,2$ м/с; $D_x = 0,48$ м²/с. Критерії подібності: $Cu = 0,25$; $Fo = 0,05$; $\gamma\Delta t = 0,0035$.

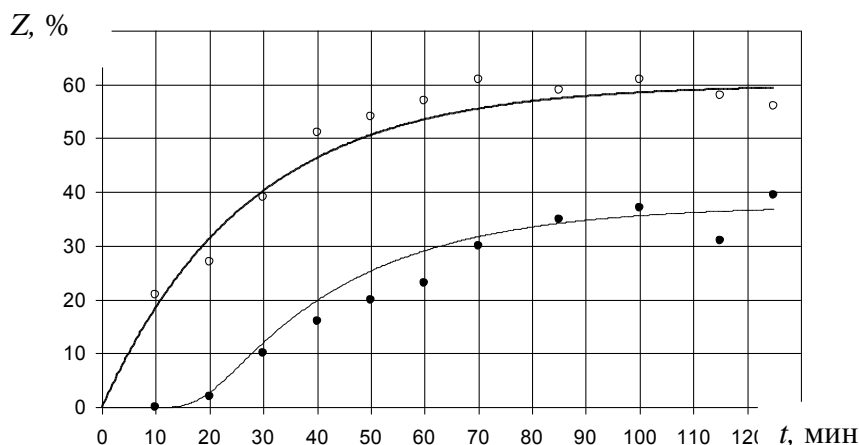


Рисунок 2 — Динаміка змінення концентрацій вуглекислого газу в різних перерізах каналу (жирна лінія – на початку, тонка лінія – в 250 м від місця подачі вуглекислого газу)

На рис. 3 приведена динаміка концентрацій кисню в різних перерізах каналу, встановлена розрахунковим шляхом при подачі вуглекислого газу. Концентрація кисню при цьому визначалася за формулою

$$C = C_0(1 - Z/100), \tag{2.27}$$

де C – концентрація кисню в довільний час, %;
 C_0 – концентрація кисню в каналі до пожежі, %.

Як видно (рис.3), досягнути при швидкості суміші газів 0,2 м/с концентрації кисню 8 – 10 % можна лише безпосередньо біля місця подачі вуглекислого газу і то через одну годину. В той же час на відстані від місця подачі CO_2 концентрація кисню снизиться лише до 13%.

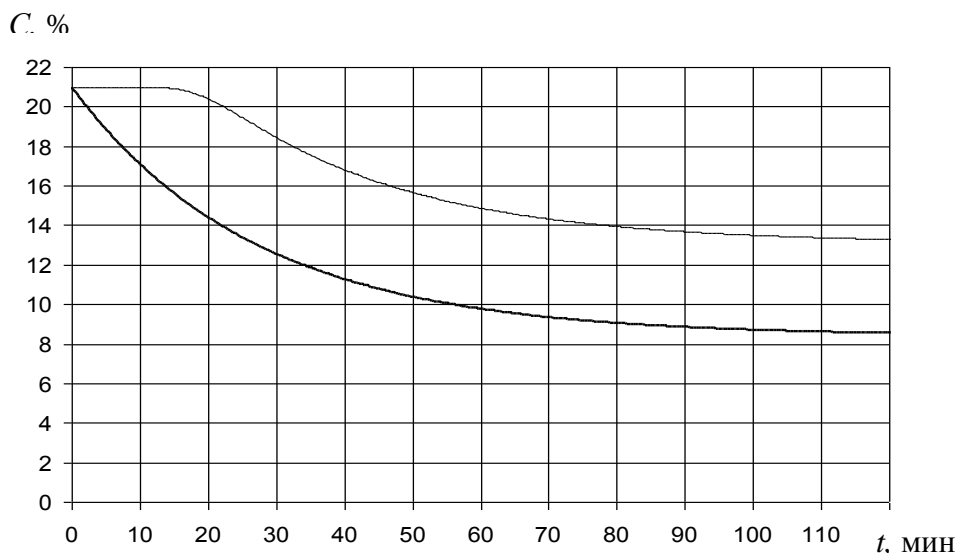


Рисунок 3 — Динаміка змінення концентрацій кисню в різних перерізах каналу (жирна лінія – на початку каналу, тонка лінія – в 250 м від місця подачі вуглекислого газу)

Щоб знати, як розподіляється концентрація вуглекислого газу, а тим самим і концентрація кисню, вздовж каналу при довготривалій інертизації його атмосфери, можна користуватися формулою (7).

На рис. 4 представлені розрахункові криві та експериментальні дані [3] розподілення концентрацій вуглекислого газу та кисню вздовж каналу (гірничої виробки).

При обробці експериментальних даних знайдено коефіцієнт поглинання $\gamma = 0,0082$ 1/с вуглекислого газу стінками каналу при швидкості руху суміші газів $u = 0,22$ м/с.

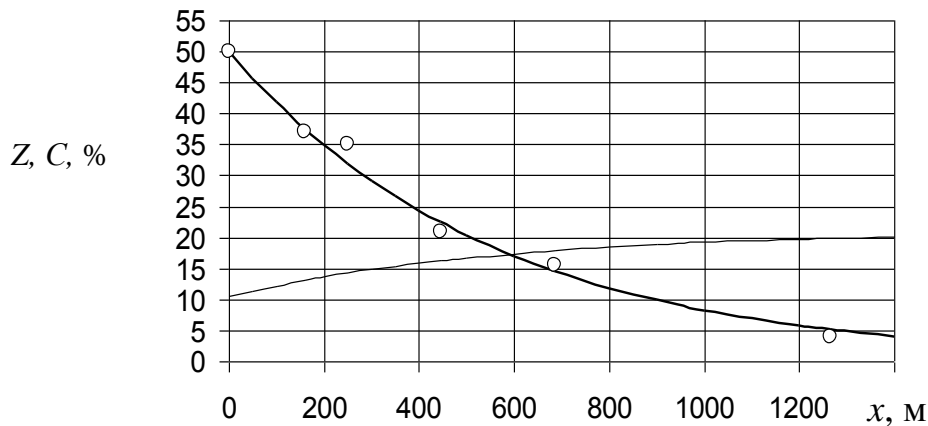


Рисунок 4 — Розподіл концентрацій вуглекислого газу та кисню вздовж каналу (гірничих виробок) при тривалій подачі CO₂ (жирна лінія – CO₂, тонка лінія – O₂) розподілення концентрацій вуглекислого газу та кисню вздовж каналу (гірничих виробок).

Тривалий вихід в початковому перерізі концентрацій азоту та кисню пояснюється їх подаванням в ізолюваний об'єм з поверхні. Тому необхідні додаткові дослідження динаміки змінні концентрацій інертного газу у разі його перемішування з потоком повітря в місці подачі.

Розроблена математична модель обґрунтування числовими методами параметрів заповнення інертними газами каналів великої протяжності, значно спрощує розрахунки.

Встановлено, що поглинання значною мірою впливає на розподіл концентрацій інертного газу по довжині каналу, зменшуючи їх до значень на великих відстанях, коли неможливо буде зупинити полум'яне горіння.

Встановлена адекватність розробленої математичної моделі натурним об'єктам при заповненні азотом та вуглекислим газом гірничих виробок з використанням відомих експериментальних даних.

Таким чином, розроблена математична модель нестационарного переносу інертного газу в каналах великої протяжності дозволяє дослідити закономірності інертизації ізолюваних та неізолюваних об'ємів інертними газами за постійного або перервного їх подавання з будь-якою тривалістю часу до повного припинення горіння.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пучков С.И. Способ тушения пожаров в кабельном туннеле / С.И. Пучков, А.А. Лебедев. – Средства противопожарной защиты: Сб. науч. Тр. – М.: ВНИИПО, 1993. – С. 49 – 61.
2. Горб В.Ю. Исследования процессов заполнения азотом изолированных участков крутого падения / В.Ю. Горб. – ВНИИГД «Горноспасательное дело», Вып.3. – М.: Недра, 1971. – С. 71 – 74.
3. Греков С.П. Газодинамика инертных сред и разгазирование горных выработок при авариях / С.П. Греков, А.Е. Калюсский. – М.; Недра, 1975. -120 с.
4. Лыков А.В. Тепломассообмен. Справочник. – М.: Энергия, 1980. – 580 с.
5. Пасконов В.М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В.М. Пасконов, В.П. Полежаев, Л.А. Чудов. – М.: Наука, 1984. – 288 с.