

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

## МОДЕЛЮВАННЯ ІНЕРТИЗАЦІЇ ОБ'ЄКТА ВЕЛИКОЇ ПРОТЯЖНОСТІ З МЕТОЮ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ

Розглянуто деякі особливості гасіння пожеж в закритих об'ємах великої протяжності інертними газами. Запропоновано математичну модель нестационарного переносу інертного газу в каналах великої протяжності, що дає змогу дослідити закономірності інертизації ізолюваних та не ізолюваних об'ємів. Показано розподіл безрозмірної концентрації інертного газу по довжині каналу в різний час з моменту його подачі без поглинання та з поглинанням інертного газу навколишнім середовищем.

**Ключові слова:** азотне пожежогасіння, інтенсивність подачі інертного газу, математична модель нестационарного переносу інертного газу.

На теперішній час традиційно використовуються способи гасіння пожежі за допомогою водяного, пінного, порошкового пожежогасіння але поряд із тим частіше стали використовувати спосіб розбавлення негорючими газами для гасіння пожеж азотом. Причому, на відміну від інших методів [1,2], за допомогою азоту можна проводити і профілактичні заходи із запобігання пожежам та вибухам, що часто являється пріоритетним завданням.

Методика азотного пожежогасіння полягає в наступному: кисень повітря, необхідний для горіння, замінюється азотом до тієї концентрації кисню, коли горіння фактично не відбувається. Для багатьох горючих речовин – це не більше 8–10% кисню (тобто, необхідно створити газову суміш, яка містить азоту і негорючих газів 92% і більше).

Однак для створення такої атмосфери, яка виключає горіння, необхідно знати з якою продуктивністю і який час потрібно заповнювати азотом об'єкт, де проходить горіння, тим більше, якщо протяжність об'єкта становить десятки, а то і сотні метрів.

З цією метою розглянемо процеси переносу інертного газу струменем повітря з урахуванням дифузії суміші та її поглинання стінками каналу або тунелю.

Для встановлення концентрації кисню в осередку пожежі, використовуємо для опису процесу переносу інертного газу рівняння нестационарної конвективної його дифузії у вигляді [3]

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uZ)}{\partial x} + \frac{\partial(vZ)}{\partial y} + \frac{\partial(wZ)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial Z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial Z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial Z}{\partial z} \right), \quad (1)$$

де  $Z$  – концентрація інертного газу, %;  $t$  – час з моменту подачі інертного газу в канал, с;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – проекції швидкості газоповітряної суміші на осі координат, м/с;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – поздовжня, вертикальна та поперечна координати, м;  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  – коефіцієнти турбулентної дифузії метану в напрямку відповідних координат, м<sup>2</sup>/с.

Спрямуємо вісь  $x$  вздовж потоку руху повітря, вісь  $y$  – від землі до покрівлі, а вісь  $z$  – від середини перерізу каналу до однієї з бокових стінок.

Враховуючи, що потік газу одно направлений з віссю каналу  $x$ , а коефіцієнти дифузії газів приймаємо за постійні величини, тоді рівняння (1) буде мати вигляд

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uZ)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2}. \quad (2)$$

Представимо другу та третю складові правої частини рівняння (2) в кінцевих різницях [4] і отримаємо

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uZ)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + 2 \left( \frac{D_y}{\Delta y^2} + \frac{D_z}{\Delta z^2} \right) (Z_0 - Z), \quad (3)$$

де  $Z_0$  – концентрація інертного газу відповідно на лівій та правій стінках каналу до пожежі, %.

Відзначимо складові в правій частині рівняння (3) через

$$\gamma = 2\left(\frac{D_y}{\Delta y^2} + \frac{D_z}{\Delta z^2}\right), \quad (4)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт поглинання інертного газу стінками каналу, 1/с.

В цьому випадку на відміну від рівняння, що використовується в ряді робіт для циліндричних виробок, рівняння (3) набуде зручного для моделювання вигляду

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uZ)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \gamma(Z_0 - Z). \quad (5)$$

Початкову умову для рівняння (5) представимо у вигляді

$$Z(x,0) = Z_0. \quad (6)$$

Таким чином, приймаємо, що концентрація інертного газу до пожежі була всюди однаковою та рівною, якщо для азоту,  $Z_0 = 79\%$ .

На лівій та правій межах потоку газів можна приймати [2]

$$1) Z(0,t) = Z_1(t); \quad 2) \frac{\partial Z(L,t)}{\partial x} = \beta[(Z_0 - Z(L,t))], \quad (7)$$

де  $Z_1(t)$  – довільно змінна в часі функція в залежності від інтенсивності подачі інертного газу, %;  $\beta$  – коефіцієнт газообміну через встановлену ізоляційну перегородку, 1/м;  $L$  – довжина каналу, м.

Існує декілька складних аналітичних рішень рівняння (1) в циліндричних координатах при постійній подачі інертного газу та при перемінній за експонентою його подачі.

Однак числові рішення рівняння (5) з початковими та граничними умовами (6) та (7) розширюють можливості для вивчення закономірностей заповнення ізольованого чи напівізольованого каналу інертним газом при постійній чи змінній за часом його подачі.

Для отримання числового рішення задачі представимо рівняння (5) в кінцевих центральних різницях проти потоку [4]:

$$Z_m^{n+1} = Z_m^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} [(uZ)_{m-1}^n - (uZ)_m^n] + \frac{D_x \Delta t}{\Delta x^2} (Z_{m-1}^n - 2Z_m^n + Z_{m+1}^n) - \gamma \Delta t Z_m^n, \quad (8)$$

де  $\Delta t$  – крок за часом, с;  $m$  – номер вузла на осі координат  $x$ ;  $n$  – номер тимчасового шару.

Приймаючи швидкість газоповітряної суміші постійною, представимо отримане рівняння (8) в критеріальному вигляді

$$Z_m^{n+1} = Z_m^n + (Cu + Fo)Z_{m-1}^n + (1 - Cu - 2Fo - \bar{\gamma})Z_m^n + FoZ_{m+1}^n, \quad (9)$$

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 інертного газу стінками каналу.

Очевидно, для стійкого рахунку за формулою необхідно, щоб

$$Cu + 2Fo + \bar{\gamma} < 1. \quad (10)$$

Вибравши кроки по довжині каналу та по часу, а також дотримуючись умови стійкості рахунку (10), початкову умову (6) при  $n = 0$  представимо в усіх точках від  $m = 0$  до  $m = M$  у вигляді

$$Z_m^0 = Z_0. \quad (11)$$

Граничні умови (7) в початковому вузлі  $m = 0$  та на виході з каналу при  $m = M$  представимо в кінцевих різницях

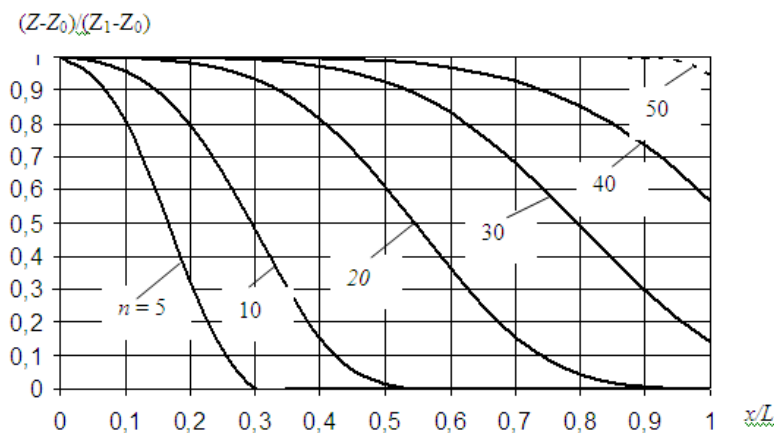
$$1) Z_0^{n+1} = Z_1(n\Delta t); \quad 2) Z_M^{n+1} = \frac{Z_{M-1}^{n+1} + \bar{\beta}Z_0}{1 + \bar{\beta}}, \quad (12)$$

де  $\bar{\beta} = \beta \Delta x$  – безрозмірний коефіцієнт газообміну на виході з каналу.

Розглянемо процес заповнення інертним газом напівізольованого каналу. Прийнято при моделюванні, що подача інертного газу в канал постійна на деякому проміжку часу з

граничними умовами алогічними (12) при  $\bar{\beta} = 1$  та  $Z_0^{n+1} = Z_1 = const$ . Тоді, задаємо початкову умову (11) та приймаємо критерії подібності рівними  $Cu = 0,5$ ;  $Fo = 0,15$ ;  $\bar{\gamma} = 0$ . Прийнятий рівним нулю безрозмірний параметр інтенсивності поглинання газів стінками каналу означає, що поглинання не враховується.

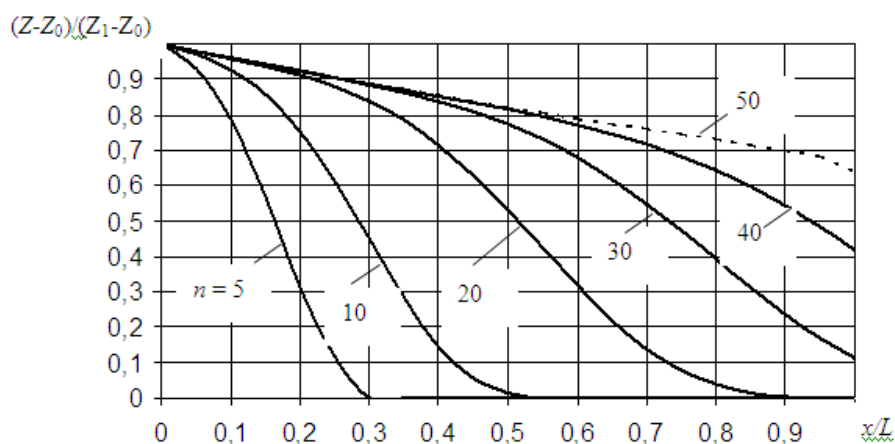
На рис. 1 представлені результати розрахунку за формулою (8) розподілу безрозмірної концентрації інертного газу по довжині каналу в різний час з моменту його подачі.



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

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

При врахуванні поглинання інертного газу стінками різко міняється заповнення. На рис. 2 показано, що навіть при значенні безрозмірного параметра інтенсивності поглинання газів  $\bar{\gamma} = 0,01$  вдається заповнити віддалену частину каналу тільки до 70 %.



**Рис. 2.** Розподіл безрозмірної концентрації інертного газу по довжині каналу в різний час з моменту його подачі з поглинанням (штрихова лінія означає кінець подачі інертного газу)

Як показують результати моделювання, наступна подача інертного газу не призводить до зміщення штрихової лінії (рис. 2), і вона залишається на місці, що вказує на кінцевий ефект поглинання стінками інертного газу.

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі натурному об'єкту, експериментальні дані [5], отримано при заповненні азотом ізолюваних гірничих виробок. Загальна довжина ізолюваного об'єму становила більше 230 м з площею поперечного перерізу до  $7 \text{ м}^2$ . Подача азоту протягом двох годин в ізолюваний об'єм відбувалася з поверхні по

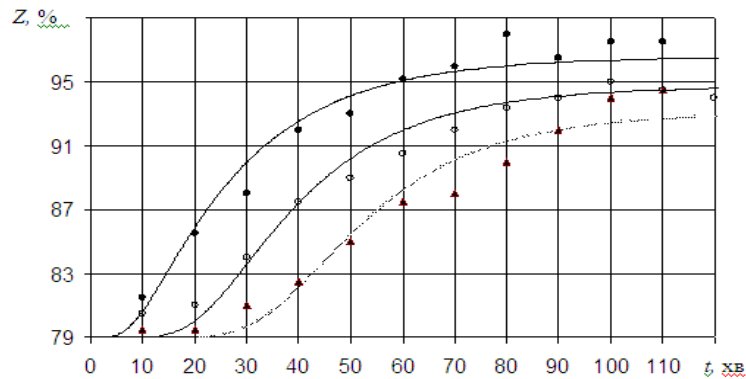
трубопроводах в тупікову частину однієї з виробок. При цьому в роботі були одночасно чотири газифіковані установки АГУ-2м продуктивністю 0,6 м<sup>3</sup>/с. Додатково до витрати азоту приєднувалися витоки повітря через перегородки в кількості приблизно 0,1 м<sup>3</sup>/с. В результаті максимальна концентрація азоту становила  $Z_1 = 97\%$ .

Експериментальні дослідження показали, що в місці подачі азоту його концентрація не відразу досягає своєї межі, а відбувається спочатку заповнення деякого об'єму за експоненціальною залежністю

$$Z(0, t) = Z_1 - (Z_1 - Z_0) \exp(-n\Delta t). \quad (13)$$

На рис. 3 представлено графіки розрахункових (криві лінії) та експериментальних даних інертизації азотом ізолюваного об'єму.

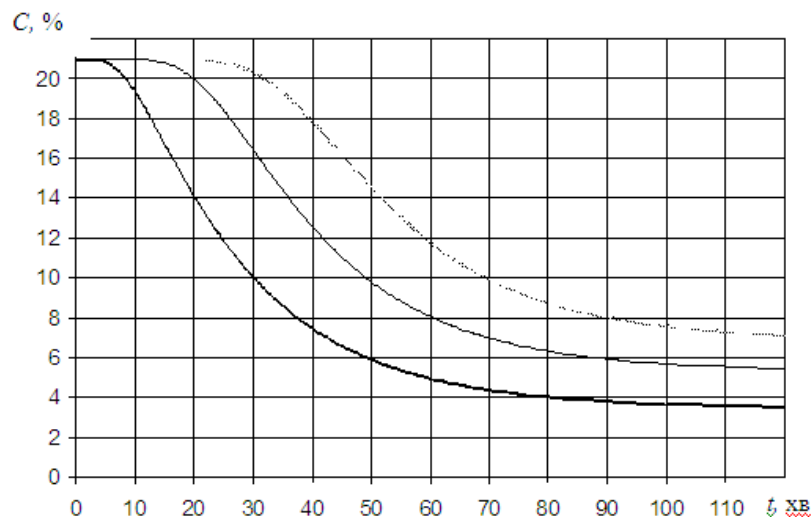
При розрахунках прийнято:  $\Delta x = 12$  м;  $\Delta t = 15$  с;  $u = 0,1$  м/с;  $D_x = 0,3$  м<sup>2</sup>/с. Критерії подібності:  $Si = 0,125$ ;  $Fo = 0,03$ ;  $\gamma\Delta t = 0,002$ .



**Рис. 3.** Динаміка концентрацій азоту в різних перерізах каналу (жирна лінія – в 55 м, тонка лінія – в 140 м та штрихова лінія – в 230 м від місця подачі азоту)

Як видно (рис. 3), розрахункові та експериментальні дані задовольняють один одного.

На рис. 4 представлено динаміку концентрацій кисню  $C = 100 - Z$  в різних перерізах каналу, встановлену розрахунковим шляхом, звідки видно, що в умовах дослід створити пожежогасну концентрацію 8 – 10 % можна тільки через 70 – 90 хвилин. При цьому незрозуміло, чи достатньо часу 30 хвилин що залишився для повного припинення горіння, що потребує додаткових досліджень, виходячи з пожежного навантаження та інших факторів.



**Рис. 4.** Динаміка концентрацій кисню в різних перерізах каналу (жирна лінія – в 55 м, тонка лінія – в 140 м та штрихова лінія – в 230 м від місця подачі азоту)

**Висновок.** Розроблена математична модель нестационарного переносу інертного газу в каналах великої протяжності дає змогу дослідити закономірності інертизації ізольованих та неізольованих об'ємів інертними газами при постійній подачі, чи подаванні через певні інтервали в часі до повного припинення горіння.

#### Список літератури

1. Ковалишин В. В. Підвищення ефективності протипожежного захисту кабельних тунелів / В. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів, С. Ю. Дмитровський // Техногенна безпека. Теорія, практика, інновації: зб. тез міжнар. наук.-практ. конф. – Львів : ЛДУБЖД, 2008. – С. 138-141.
2. Ковалишин В. В. Моделювання впливу парогазових потоків на пожежу в каналах великої довжини / В. В. Ковалишин // Науковий вісник УкрНДІПБ. – К. : УкрНДІПБ. – 2011. – №2 (24). – С. 191-199.
3. Лойцянский Л. Г. Механика жидкостей и газов / Л. Г. Лойцянский. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.
4. Пасконов В. М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В. М. Пасконов, В. М. Полежаев, Л. А. Чудов. – М. : Наука, 1984. – 288 с.
5. Горб В. Ю. Исследование процессов заполнения азотом изолированного участка круглого падения / В. Ю. Горб. – ВНИИГД «Горноспасательное дело», Вып.3. – М. : Недра, 1971. – С. 71-74.

*В.В. Ковальшин, В.М. Ковальчик, Т.В. Бойко*

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНЕРТИЗАЦИИ ОБЪЕКТА БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ С ЦЕЛЮ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА

Рассмотрены некоторые особенности тушения пожара в закрытых объемах большой протяженности инертными газами. Предложена математическая модель переноса инертного газа в каналах большой протяженности, которая дает возможность исследовать закономірности инерттизації ізолюваних та неізолюваних об'ємів. Показано распределение безразмерной концентрации инертного газа по длине канала в разное время с момента его подачи с поглощением и без поглощения инертного газа окружающей средой.

**Ключевые слова:** азотное пожаротушение, интенсивность подачи инертного газа, математическая модель нестационарного переноса инертного газа.

*V.V. Kovalyshyn, V.M. Kovalchik, T.V. Boyko*

#### INERTISATION MODELLING OF LONG MILEAGE OBJECT WITH THE AIM OF FIRE EXTINGUISHING

Some fire extinguishing peculiarities with noble gas in closed long mileage objects are examined. Mathematical model of noble gas nonstationary transfer in long mileage channels allowing to research inertisation regularities of both illusive and non illusive capacity was suggested. Allocation of noble gas dimensionless concentration in different time from its supply moment both without and with noble gas absorption with environment was outlined.

**Keywords:** nitrogen fire-extinguishing, noble gas flow rate, mathematical model of noble gas nonstationary transfer.

