

УДК 614.846

Я.Б. Кирилів, канд. техн. наук, ЛДУБЖД

## ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРИ ПОЖЕЖНИХ ГАЗІВ ПРИ ВІЛЬНІЙ ТЕПЛОВІЙ КОНВЕКЦІЇ ПОВІТРЯ В ЗАМКНУТОМУ ОБ'ЄМІ

В статті зроблено прогноз температури пожежних газів при вільній тепловій конвекції повітря в замкнутому об'ємі на основі емпіричної залежності, яка дозволила отримати формулу для розрахунку температури пожежних газів. Проведено порівняння розрахункових даних із експериментальними і показано, що виконані розрахунки правильно відображають схему руху пожежних газів, дають достовірний прогноз, як швидкості руху пожежних газів і їх витрати, так і температури біля піногенератора. Отримана формула може бути використана для вибору відстані від піногенератора до місця відбору пожежних газів для генерування піни на їх основі при заданій температурі.

**Ключові слова:** кратність піни, температура парогазової суміші, емпірична залежність, пожежні гази, газоповітряна суміш, піногенератор, температура продуктів горіння

**Постановка проблеми.** З метою зменшення навантаження на розташування інженерно-комунікаційних мереж на поверхні інженери-конструктори більшості країн світу намагаються вирішувати такі завдання зануривши їх під шар земної поверхні. Перш за все це стосується протяжних об'єктів (каналів, тунелів, труб та ін.). Прогноз підказує, що в майбутньому кількість таких об'єктів буде тільки зростати. Однак вони представляють собою об'єкти підвищеної небезпеки.

Пожежа, наприклад, яка відбувається на поверхні має значну кількість небезпечних для життя людини факторів: дим, високу температуру, знижений вміст кисню в повітрі, обвал конструкцій і т. д. Але в протяжних об'єктах перелічені фактори здатні значно швидше досягати критичних величин. Тому ліквідація пожеж в підземних спорудах пов'язана з великими складностями.

Для гасіння таких пожеж застосовують метод їх ізоляції. Скоротити в декілька разів терміни їх гасіння можна шляхом застосування рециркуляції, коли продукти горіння багатократно подаються до осередку пожежі.

З цією метою була розроблена математична модель впливу на осередок пожежі піни, яка дозволила отримати аналітичні залежності динаміки розвитку пожежі як до застосування засобів його гасіння, так і при їх використанні з урахуванням нагріву і остигання оточуючих порід [1, 2]. Зокрема отримана залежність для динаміки температури в осередку пожежі. Для обґрунтування цієї залежності необхідна експериментальна перевірка.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** В роботі [1] досліджено тепломасообмінні процеси в ізольованому каналі із замкнутим контуром провітрювання, розглянуто динаміку газових і пінних потоків, їх вплив на осередок пожежі і комплексний вплив пожежі на нього продуктів згорання і отриманої на їх основі газомеханічної піни. Встановлено результати моделювання втрат газової фази в піні по довжині каналу при різних параметрах, які характеризують стійкість піни, а також зміну густини піни вздовж каналу при різній швидкості її витікання. Крім того, розглянуто вплив на осередок горіння в протяжних каналах інертної піни, отриманої на основі продуктів горіння. Отримані результати моделювання динаміки температури в осередку горіння [2].

**Постановка задачі та її розв'язання.** Основною метою роботи є встановлення на основі емпіричної залежності формули для розрахунку температури пожежних газів при вільній тепловій конвекції повітря в замкнутому об'ємі та їх порівняння з експериментальними даними.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття.**

При моделюванні динаміки температури в осередку пожежі приймаються довільні значення вихідних параметрів, однак отримані результати відображають реальну картину, процесів які відбуваються і спостерігаються при пожежах. В той же час для обґрунтування цих параметрів необхідні експериментальні дослідження, які підтверджують адекватність математичної моделі реальному об'єкту [2].

**Методика досліджень.** Для проведення експериментів на відстані 40 м від гирла встановлювалась ізолююча бетонітова перемичка, а в гирлі штольні – навісна брезентова перемичка з пройомами. Центральний пройом призначений для подачі піни, а верхній пройом – для вентиляційної труби, по якій за допомогою вентилятора місцевого провітрювання відбиралось повітря із ізольованого об'єму і подавалось в піногенератор.

В ізольованому об'ємі були розміщені три замірні станції (на кінцях і в середині) для вимірювання температури хромель-алюмелевими термопарами біля покрівлі, посередині перерізу і біля ґрунту. Термопари під'єднували через перемикач до мілівольметра. На кожній замірній станції проводився дистанційний відбір проб повітря в нижній і верхній частинах штольні. Для вимірювання висоти пінного потоку на замірних станціях встановлювались вертикально рейки з діленнями через 20 см, які фіксували появу піни шляхом замикання електричного кола.

В якості пального матеріалу використовувалась деревина, яка вкладалась біля бетонітової перемички у вигляді вогнища вагою 300 кг і пожежним навантаженням 150 кг/м на довжині 2 – 3 м.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.**

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що збільшення кількості піноутворювача призводить до збільшення кратності піни, а додавання ще однієї сітки,

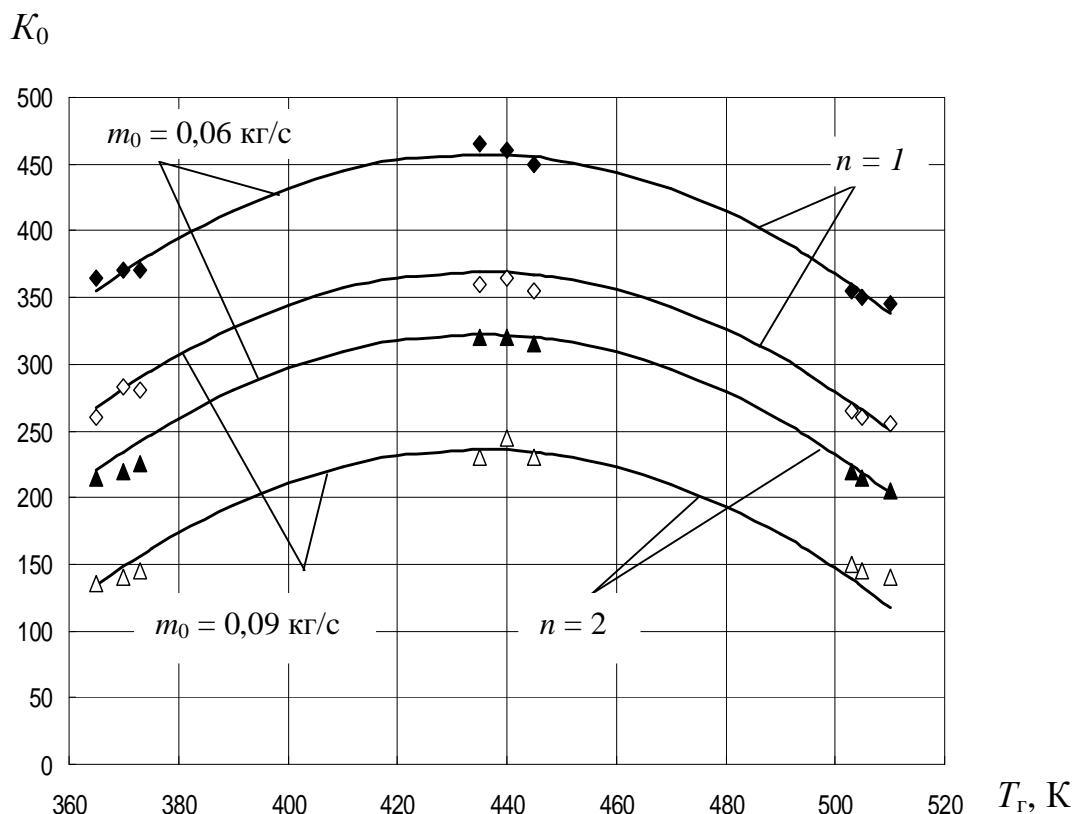


Рисунок 1. Залежність початкової кратності піни від температури парогазової суміші при різних густині зрошення і різних кількості сіток

навпаки, зменшує кратність піни. Максимум початкової кратності піни спостерігається при швидкості парогазової суміші, що дорівнює 6 м/с.

Зміна початкової кратності від температури парогазової суміші також підлягає параболічному закону (рис. 1):

$$K_0 = -3205 + (18,26 - 0,021T_2)T_2 - 2867m_0 - 135n, \quad (1)$$

де  $T_2$  – температура парогазової суміші, К;

$m_0$  – густина зрошення, кг/с;

$n$  – кількість сіток.

Тут максимальна кратність піни спостерігається при температурі парогазової суміші, що дорівнює 440 К, після чого кратність падає.

При лабораторних дослідженнях встановлена емпірична залежність (1) початкової кратності піни від температури парогазової суміші і ряду інших параметрів. Оскільки згідно технічної характеристики піногенератора наперед відома початкова кратність піни при нормальній температурі, формулу (1) можна перетворити до виду

$$K_0 = K_0^T + [18,26 - 0,021(T_2 + T_0)](T_2 - T_0), \quad (2)$$

де  $K_0^T$  – початкова кратність піни при нормальній температурі у відповідності з технічною характеристикою піногенератора;

$T_0$  – початкова температура, яка приймається рівною 293 К.

При температурі пожежних газів 293 – 373 К з достатнім ступенем точності можна користуватися формулою

$$K_0 = K_0^T + 5(T_2 - T_0). \quad (3)$$

Максимальна похибка при порівнянні даних розрахунків за формулами (2) і (3) не перевищує 15% в діапазоні температур 293 – 373 К. Об'єднуючи експериментально підтвержені залежності  $K = K_0 \exp(0,005t)$ ,  $t = xS/Q$  і (3), отримаємо розрахункову формулу для визначення кратності піни в осередку пожежі, якщо наперед відомі температура продуктів горіння у піногенератора і його продуктивність.

$$K = [K_0^T + 5(T_2 - T_0)] \exp(0,005xS/Q), \quad (4)$$

де  $x$  – координата вздовж осі потоку, м;

$S$  – площа поперечного перерізу каналу, м<sup>2</sup>;

$Q$  – продуктивність піногенератора, м<sup>3</sup>/с.

При відсутності примусової вентиляції, як показали експерименти, горіння в ізольованому об'ємі все одно буде продовжуватися за рахунок вільної конвекції повітря, яка викликана вертикально діючою тепловою депресією. В цьому випадку пожежні гази скеровуються під покрівлю штольні і рухаються від бетонітової перемички до брезентової. Змішуючись з повітрям, пожежні гази частково повертаються понизу до осередку пожежі, як показано на рис. 2.

При циркуляції пожежних газів утворюються три шари повітря: верхній і нижній – рухомі і між ними – нерухомий. Прийmemo, що товщина шарів однакова.

Визначимо величину теплової депресії, яка діє в горизонтальній виробітці в напрямку від ґрунту до її покрівлі за формулою [3]

$$h_2 = \delta \rho_0 g (1 - T_0 / T_2) H, \quad (5)$$

де  $\delta$  – частина висоти каналу з нерухомим шаром;

$\rho_0$  – густина повітря при нормальній температурі,  $\text{кг/м}^3$ ;

$g$  – прискорення вільного падіння ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ );

$T_0$  – температура до пожежі, К;

$T_2$  – температура горіння, К;

$H$  – висота виробітки, м.

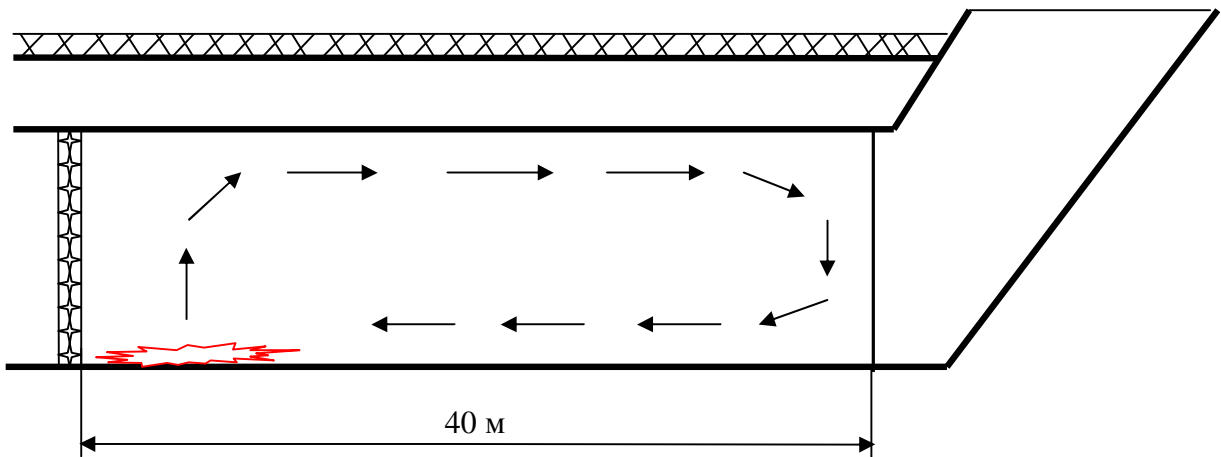


Рисунок 2. Схема циркуляції пожежних газів в ізолюваному об'ємі каналу

Цій тепловій депресії буде протидіяти теплова депресія біля брезентової перемички, оскільки ще не остуджені пожежні гази не всі опускаються вниз, до ґрунту каналу. Цю теплову депресію знайдемо по такій же формулі, як і (5), але замість  $T_2$  підставимо в неї  $T_1$  – середню температуру біля брезентової перемички:

$$h_1 = \delta \rho_0 g (1 - T_0 / T_1) H. \quad (6)$$

Віднімаючи з величини теплової депресії біля брезентової перемички величину теплової депресії біля бетонітової перемички, знайдемо сумарну теплову депресію, яка діє в ізолюваному об'ємі

$$h_m = \delta \rho_0 g (T_0 / T_1 - T_0 / T_2) H \quad (7)$$

Очевидно, що чим даліше від осередку пожежі знаходиться брезентова перемичка, тим більша буде теплова депресія і навпаки.

Частина висоти каналу, де діє теплова депресія, як було прийнято, рівна  $\delta = 1/3$ . Тоді, як показали спостереження, при середній температурі в осередку пожежі  $T_r = 723 \text{ К}$ , температурі біля брезентової перемички  $T_1 = 343 \text{ К}$  і зовнішньої температури  $T_0 = 293 \text{ К}$ , знайдемо за формулою (7) сумарну величину теплової депресії

$$h_m = \frac{1}{3} 1,2 \cdot 9,81 (293/343 - 293/723) 2 = 3,5 \text{ Па.}$$

Під дією теплової депресії замкнений потік газоповітряної суміші в ізольованому об'ємі долає дві відстані від однієї перемички до другої, при цьому зустрічає на шляху чотири повороти, як місцеві опори рухові. Це дозволяє визначити швидкість руху повітря під покрівлею і біля ґрунту каналу, застосовуючи відому в гідравліці формулу [4]

$$h_m = \left( \frac{2\lambda l}{d_{np}} + 4\zeta \right) \frac{\rho_0 v^2}{2}, \quad (8)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт аеродинамічного опору каналу по довжині;

$\zeta$  – коефіцієнт місцевого опору при повороті потоку;

$l$  – довжина зони циркуляції пожежних газів, м;

$d_{np}$  – приведений діаметр потоку газів, м;

$v$  – швидкість руху пожежних газів, м/с.

Розв'язуючи формулу (8) відносно швидкості руху газів під покрівлею в замкнутому контурі, знайдемо

$$v = \sqrt{\frac{h_m / \rho_0}{\lambda l / d_{np} + 2\zeta}}. \quad (9)$$

В формулі (9) невідомий приведений діаметр потоку пожежних газів. Його визначимо за формулою, як відношення початкової площі до периметру

$$d_{np} = 4\delta S / (2b + 2\delta H), \quad (10)$$

де  $b$  – ширина каналу, м.

Підставляючи в формулу (10) числові значення, знайдемо

$$d_{np} = 4 \frac{1}{3} 2 / (2 \cdot 2 + 2 \frac{1}{3} 2) = 0,5 \text{ м.}$$

Підставляючи вихідні дані в формулу (9), знайдемо швидкість потоку газоповітряної суміші до осередку пожежі в експериментах

$$v = \sqrt{\frac{3,5/1,2}{0,1 \cdot 40/0,5 + 2 \cdot 1}} = 0,54 \text{ м/с.}$$

При цьому прийняті: коефіцієнт аеродинамічного опору шорсткуватих каналів  $\lambda = 0,1$  і коефіцієнт місцевих опорів  $\zeta = 1$  при повороті потоку на  $90^\circ$  [4]. Коефіцієнт аеродинамічного опору шорсткуватих каналів  $\lambda$  приймався із розрахунку коефіцієнта, який визначається в шахтній вентиляції як [4]

$$\alpha_p = \frac{\lambda \rho_0}{8g},$$

звідки для закріплених і шорстких каналів при середньому значенні  $\alpha_p = 15 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$  [4] знаходимо  $\lambda \approx 0,1$ .

Витрата повітря в експериментах при циркуляції пожежних газів в ізольованому об'ємі буде дорівнювати

$$Q = \nu \delta S = 0,54 \frac{1}{3} 4 = 0,72 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Температуру продуктів горіння у піногенератора можна визначити, використовуючи відому залежність [5] зміни температури пожежних газів по довжині каналу без врахування переміщення осередку пожежі

$$T_1 = T_0 + (T_2 - T_0) \exp\left(-\frac{\alpha_0 \Pi x}{\rho_0 c_p Q}\right), \quad (11)$$

де  $\alpha_0$  – коефіцієнт тепловіддачі оточуючому масиву поза зоною горіння, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\Pi$  – периметр поперечного перерізу каналу, м;

$c_p$  – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·К).

При користуванні формулою (11) периметр поперечного перерізу каналу приймається, як подвоєна ширина каналу плюс його висота:

$$\Pi = 2(H + b). \quad (12)$$

За даними [5] коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha = 4,42 + 3,54\nu. \quad (13)$$

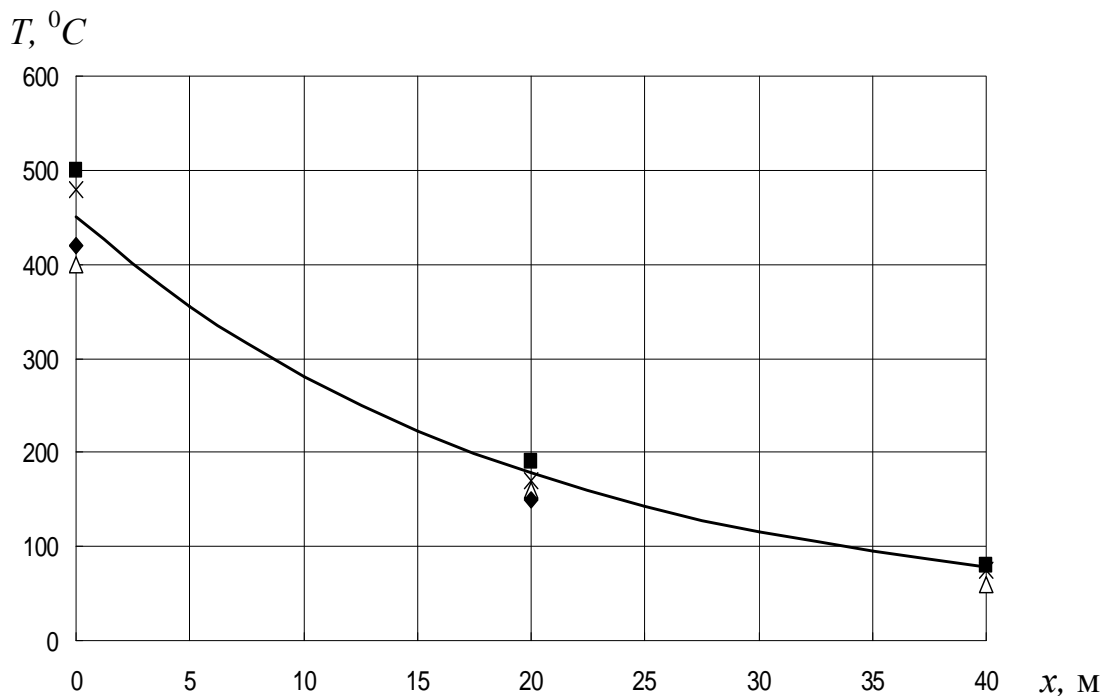


Рисунок 3. Результати порівняння розрахункової кривої зміни температури пожежних газів вздовж дослідної штольні з експериментальними даними до подачі піни

Порівняємо, наскільки відрізняються результати розрахунку за формулою (11) від даних вимірювань температури пожежних газів в ізольованому об'ємі при пожежі. Для розрахунку вибрані наступні вихідні дані:  $S = 4 \text{ м}^2$ ;  $b = 2 \text{ м}$ ;  $Q = 0,72 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_r = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_p = 1040 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$  [6].

Коефіцієнт тепловіддачі знайдений по формулі (13) і рівний  $\alpha = 6,3 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ .

На рис. 3 наведена крива температури пожежних газів вздовж каналу, яка розрахована за формулою (11) із використанням співвідношень (12) і (13). Там же наведені експериментальні дані вимірювань температури у чотирьох дослідках (маркери).

**Висновки.** Результати порівняння показують, що виконані розрахунки правильно відображають схему руху пожежних газів, дають достовірний прогноз як швидкості руху пожежних газів і їх витрати, так і температури біля піногенератора.

Формула (11) може бути використана не тільки для розрахунку температури пожежних газів, які поступають до піногенератора, але і для вибору відстані від піногенератора до місця відбору пожежних газів для генерування піни на їх основі при заданій температурі.

**Перспективи подальших досліджень.** На даний час відсутня перевірка адекватності розробленої математичної моделі. Тому, метою подальших досліджень є визначення розрахункової дальності просування піни без пожежі і її збіжності з даними експериментів та перевірка адекватності розробленої математичної моделі і ефективності комплексного впливу на осередок пожежі піною і пожежними газами.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ковалишин В. В. Динаміка газово-пінних потоків в замкнутому об'ємі каналу під час гасіння пожежі / В. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів, Т. В. Бойко // Пожежна безпека. – 2009. – № 15. – С. 16 – 24.
2. Ковалишин В. В. 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. – 2009. – № 4. – С. 67 – 71.
3. Астапенко В. М., Кошмаров Ю. А., Молчадский И. С., Шевляков А. Н. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В. М. Астапенко, Ю. А. Кошмаров, И. С. Молчадский, А. Н. Шевляков. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.
4. Лыков А. В. Теплообмен. Справочник. / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1980. – 580 с.
5. Осипов С. Н., Жадан В. М. Вентиляция шахт при подземных пожарах. / С. Н. Осипов, В. М. Жадан – М.: Недра, 1973. – 152 с.
6. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. / Д. Драйздейл – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.