

*В.В. Ковалишин, д-р техн. наук, професор, В.М. Ковальчик, Р.Я. Лозинський, канд. техн. наук, доцент, С.І. Гончаренко (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності), В.В. Мамаєв, д-р техн, с.н.с. (НДІГР та ПБ)*

### **ФІЗИЧНЕ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ІНЕРТНИМИ ГАЗАМИ В КАБЕЛЬНОМУ ТУНЕЛІ**

Розроблена зонна модель розвитку та гасіння пожеж з розбиттям на дві зони: осередок горіння та інша частина ізольованого об'єму, що спрощує задачу і дає змогу розглядати процеси тепломасообміну тільки в часі в кожній зоні.

Запропоновано чисельний метод розв'язку в неявному вигляді системи рівнянь динаміки температури і концентрації кисню в зонах і в навколишньому середовищі з урахуванням розширення і стисливості газів.

Математично змодельований процес розвитку та гасіння пожежі інертними газами з подальшою їх рециркуляцією в зоні горіння, за її межами і в навколишньому середовищі.

Проведено експериментальні дослідження розвитку та гасіння азотом і вуглекислим газом дрібномасштабних пожеж в камері з геометричним критерієм подібності 1: 4.

Встановлена адекватність математичної моделі натурним об'єктам як дрібномасштабних, так і великомасштабних пожеж при їх гасінні інертними газами з подальшою рециркуляцією продуктів горіння.

**Ключові слова:** кабельні тунелі, пожежа, гасіння, азот, вуглекислий газ, рециркуляція, математична модель, чисельний метод, розширення газів, камера, адекватність моделі

*В.В. Ковалишин, В.М. Ковальчик, Р.Я. Лозинский, С.И. Гончаренко, В.В. Мамаев*

### **ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ИНЕРТНЫМИ ГАЗАМИ В КАБЕЛЬНОМ ТУННЕЛЕ**

Разработана зонная модель развития и тушения пожаров с разбиением на две зоны: очаг горения и остальная часть изолируемого объёма, что упрощает задачу и позволяет рассматривать процессы тепломассообмена только во времени в каждой зоне.

Предложен численный метод решения в неявном виде системы уравнений динамики температуры и концентрации кислорода в зонах и в окружающем массиве с учётом расширения и сжимаемости газов.

Выполнено математическое моделирование развития и тушения пожара инертными газами с последующей их рециркуляцией в зоне горения, за её пределами и в окружающем массиве.

Выполнены экспериментальные исследования развития и тушения азотом и углекислым газом мелкомасштабных пожаров в камере с геометрическим критерием подобия 1:4.

Установлена адекватность математической модели натурным объектам как мелкомасштабных, так и крупномасштабных пожаров при их тушении инертными газами с последующей рециркуляцией продуктов горения.

**Ключевые слова:** кабельные туннели, пожар, тушение, азот, углекислый газ, рециркуляция, математическая модель, численный метод, расширение газов, камера, адекватность модели

## PHYSICAL AND MATHEMATICAL SIMULATION OF FIRE EXTINGUISHING IN THE CABLE TUNNEL WITH USING OF INERT GASES

The model which deals with dividing of fire area on two parts (the fire bed and the rest of the isolated volume) is performed. It simplifies the scientific task and allows us to consider the processes of heat transfer in each zone separately.

A numerical method for solving an equations system of the temperature and oxygen concentration change dynamics in each zone is proposed. It allows taking into account the expanding and compressibility of gases.

The mathematical simulation of fire extinguishing with inert gases with subsequent recirculation inside and outside the combustion zone is made.

Experimental study of fire extinguishing in small chambers with geometric similarity criterion 1.4 using nitrogen and carbon dioxide was made.

The adequacy of mathematical simulation for small-scale and large-scale object fires and their suppression with inert gases followed by recirculation of combustion products is proved.

**Key words:** cable tunnels, fire, fire extinguishing, nitrogen, carbon dioxide, recycling, mathematical simulation, numerical method, expanding of gases, chamber, adequacy of mathematical simulation.

**Постановка завдання.** Найбільш часто пожежі на об'єктах електроенергетики виникають в кабельних тунелях. І, незважаючи на використання в даний час нових типів кабелів з важкогорючою оболонкою, кількість пожеж не знижується. Тут, при пожежах в кабельних тунелях характерним є дуже швидкий їх розвиток. За 10-12 хвилин температура в зоні горіння може сягати 700-800°C. Особливістю профілактики на таких об'єктах є складний доступ для персоналу до кабельної системи для перевірки її стану.

Відомі установки газоводяного пожежогасіння типу, наприклад, АГВГ добре себе зарекомендували при гасінні палаючих фонтанів газу, однак вони не придатні для створення інертного середовища в ізольованих підземних об'єктах, віддалених від установки більш ніж на 15 - 25 м.

У зв'язку з цим виникає необхідність у розробці нових високоефективних способів і засобів пожежогасіння. Дослідження процесів інертизації пожежних об'єктів різної протяжності азотом або діоксидом вуглецю, встановлення закономірностей горіння твердого палива в умовах низьких концентрацій кисню є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої сприяє безпечному та ефективному гасінню пожеж та проведенню аварійно-рятувальних робіт на об'єктах з підвищеною небезпекою.

**Основна частина.** Для опису процесів розвитку і гасіння пожеж в каналах використовуємо рівняння збереження енергії і збереження маси кисню [1]:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + qC / C_0, \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\delta C q}{c_p T_0}, \quad (2)$$

де  $\rho$  – щільність газів, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – питома теплоємність газів при постійному тиску, Дж/(кг•К);  $u$  – швидкість повітря уздовж каналу, м/с;  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  – коефіцієнти теплопровідності вздовж відповідних напрямків, Вт/(м•К);  $T$  – температура, К;  $T_0$  – температура при нормальних умовах, К;  $q$  – інтенсивність внутрішнього джерела тепла при горінні, Вт/м<sup>3</sup>;  $C$  – концентрація кисню;  $C_0$  – концентрація кисню при нормальних умовах;  $D_x, D_y, D_z$  – коефіцієнти турбулентної дифузії кисню в напрямку відповідних координат, м<sup>2</sup>/с;  $x$  – поздовжня вздовж каналу

координата, м; у та z – відповідно поперечна і вертикальна координати, м;  $\delta$  – коефіцієнт витрати кисню на хімічні реакції з газоподібними продуктами піролізу.

Представимо другу похідну по поперечних координатах в кінцевих різницях і, вважаючи однаковими кроки  $\Delta y = \Delta z$ , отримуємо

$$\frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial T}{\partial x} = a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 16a_y \frac{T_{\text{ст}} - T}{S} + \frac{qC}{\rho_0 c_p T_0}; \quad (3)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial C}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial C}{\partial x} = \tilde{D}_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + 16\tilde{D}_y \frac{C_0 - C}{S} - \frac{\delta C q}{\rho_0 c_p T_0}, \quad (4)$$

де  $\rho_0$  – щільність газів при нормальних умовах, кг/м<sup>3</sup>;  $\tilde{u} = \rho u / \rho_0$  – приведена масова швидкість газів уздовж каналу, м/с;  $a_x = \lambda / (\rho_0 c_p)$  – коефіцієнт теплопровідності вздовж потоку газів, м<sup>2</sup>/с;  $a_y = \lambda / (\rho_0 c_p)$  – коефіцієнт теплопровідності в напрямку до стінок каналу, м<sup>2</sup>/с;  $\tilde{D}_y = \rho D_y / \rho_0$  – приведений коефіцієнт дифузії до стінок каналу, м<sup>2</sup>/с;  $T_{\text{ст}}$  – температура на стінках каналу, К.

Введення масової швидкості дає змогу приймати її за константу в рівняннях (3) і (4) і врахувати розширення і стисливість газів. При цьому, якщо швидкість буде збільшуватися, то щільність буде зменшуватися, але масова швидкість залишиться постійною.

При дозвукових потоках газів тиск змінюється незначно, тому рівняння стану газів можна представити у вигляді

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

де  $T_0$  – температура при нормальних умовах, К.

Враховуючи рівняння стану газів (5), запишемо систему рівнянь (3) і (4) у вигляді

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

$$\frac{1}{\bar{T}} \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = \tilde{D}_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + 16\tilde{D}_y \frac{1 - \bar{C}}{S} - \frac{\delta q \bar{C}}{\rho_0 c_p T_0}. \quad (7)$$

Параметри формули (7, 8) означають безрозмірну температуру і концентрацію кисню. Функції джерел виділення теплоти і поглинання концентрації кисню, що входять в систему рівнянь, є невідомими і потребують подальшого визначення.

При тривалих процесах горіння необхідно враховувати ще нагрівання стінок каналу з наступним їх охолодженням. Тому необхідно додати ще рівняння нагрівання порід довкола каналу [2]:

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

де  $\theta$  – температура порід довкола каналу, К;  $a$  – коефіцієнт теплопровідності порід, м<sup>2</sup>/с.

Систему рівнянь (6) – (8) будемо розв'язувати чисельним методом скінчених різниць. В цьому випадку рівняння (8), обмежуючись тільки одним елементом розбиття, набуде вигляду

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

де  $\bar{a} = \frac{a \Delta \tau}{2 \Delta y^2}$  – безрозмірний коефіцієнт теплопровідності навколишнього середовища,

$\Delta \tau$  – крок за часом, с;  $n$  – номер кроку за часом.

Температура на стінках каналу визначається за формулою

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

До рівняння (10), нехтуючи температуропровідністю та повздовжньою дифузією стиснених газів, додамо з урахуванням стиснення газів рівняння (6) в кінцевих різницях

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

де  $Cu = \tilde{y} \Delta \tau / \Delta x_2$  – схемне число Куранта;  $\bar{\gamma}_1 = 8\alpha_y \Delta \tau / S$  – 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;  $\Delta x_2$  – довжина зони горіння, м.

Аналогічно, нехтуючи дифузією газів в порівнянні з напірним їх рухом, представимо з урахуванням стиснення газів 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 та другій зонах;  $\bar{\gamma}_2 = 16D_y \Delta \tau / S$  – безрозмірний коефіцієнт поглинання інертного газу.

З формули (13) виходить, що за 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 замкнутому контурі. Аналіз системи цих рівнянь показує, що вона є абсолютно стійкою, оскільки не містить в чисельнику доданків зі знаком «мінус». Окрім цього, вказана система відрізняється від аналогічної системи рівнянь [2] ступенем стиснення газів.

Джерело тепловиділення при горінні представимо в аналітичному вигляді:

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

де  $\bar{q}_0$  – відносне максимальне тепловиділення при пожежі;  $k = 2/\tau_m$  показник швидкості 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) вважатимемо

$$\bar{\zeta}^0 = \bar{C}_0 = \bar{T}^0 = \bar{\theta}^0 = 1. \quad (15)$$

Для концентрації кисню гранична умова при подачі інертного газу перед зоною горіння має такий вигляд [2]:

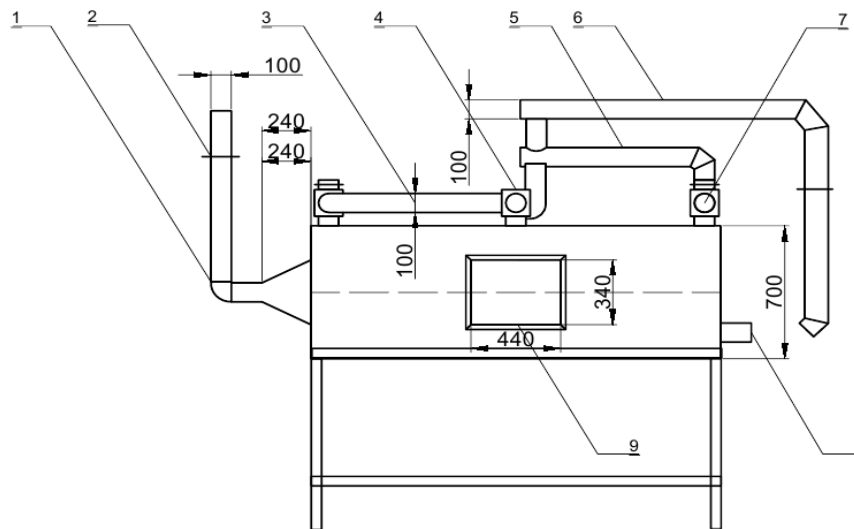
$$\bar{\zeta}_0^{n+1} = 1 + 0,25 \left( 1 + \frac{n - n_2}{|n - n_2|} \right) \left( 1 + \frac{n_3 - n}{|n_3 - n|} \right) (\bar{C}^n - 1). \quad (16)$$

Аналіз отриманої формули (16) показує, що після подачі інертного газу та утворення замкнутого контура концентрація кисню на виході з зони горіння буде потрапляти на вхід в першу зону до тих пір, поки  $n < n_3$ . Як тільки контур буде розімкнено і на вхід в першу зону почне надходити свіже повітря з концентрацією кисню, що дорівнює «1».

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

Розроблено алгоритм та програму розрахунку динаміки за часом температури в зоні горіння та на стінках каналу, а також концентрації кисню в зоні горіння та перед нею.

Експериментальні дослідження процесів розвитку та гасіння пожеж інертними газами з наступною їх рециркуляцією були проведені в лабораторних умовах. З цією метою було споруджено фізичну модель, схему якої представлено на рис. 1.



**Рисунок 1** – Установа для дослідження визначення горіння кабелів та ефективності гасіння їх різними вогнегасними речовинами в закритих об'ємах:

1 – трубопровід для видалення продуктів згоряння в атмосферу, 2 – шубер, 3 – холодильник, 4 – вентилятор, 5, 6 – трубопровід для проведення рециркуляції, 7 – отвір для подачі вогнегасних засобів, 8 – отвір для підсмоктування повітря, 9 – оглядове вікно

Термодатчики температури розміщувалися на початку, посередині та вкінці камери на різній висоті (на нижній відмітці, посередині та на верхній відмітці камери). Довжина камери – 2 м, висота – 0,6 м і ширина – 0,4 м.

При таких геометричних розмірах камери масштаб моделювання становить 1:4. Це еквівалентно довжині кабельного тунелю 8 м при приведеному діаметрі 2 м.

Потужність витяжної вентиляції забезпечує рух повітряного потоку всередині камери від 0,024 до 0,076 м<sup>3</sup>/с із середньою швидкістю 0,1 – 3,0 м/с. Це відповідає числу Рейнольдса 3000 – 10000.

Таким чином, режим руху газів в камері турбулентний, як і в реальному об'єкті – тунелі, тим самим набагато перевищує поріг ламінарного руху, який дорівнює 2000.

Кабельна продукція розміщується у лотках на висоті 20, 30 см від нижнього рівня камери. В камеру згоряння завантажують 7,25 кг кабельної продукції, з якої 5 кг – це горюча ізоляція. Кабелі довжиною 1 м, п'ять частин займають площу 0,3 м<sup>2</sup>. Підпалюють кабельну лінію протягом 4 хв газовим пальником з робочою довжиною 30 см. Висота полум'я – 15 см зі сторони отворів, через які подається повітря для підтримання горіння. За даний період часу настає стійке полум'яне горіння.

Запалювання здійснюється при швидкості потоку повітря, як уже зазначено, 0,024 – 0,076 м<sup>3</sup>/с на вході в камеру.

З метою встановлення ефективності гасіння пожеж в кабельних тунелях інертними газами проведено попередні дослідження в лабораторних умовах без дії на осередок пожежі різноманітних засобів.

Концентрація кисню в цих дослідженнях знижувалася навіть до 5 %, а температура підвищувалася до 700 – 800 °С на 10-12 хвилині.

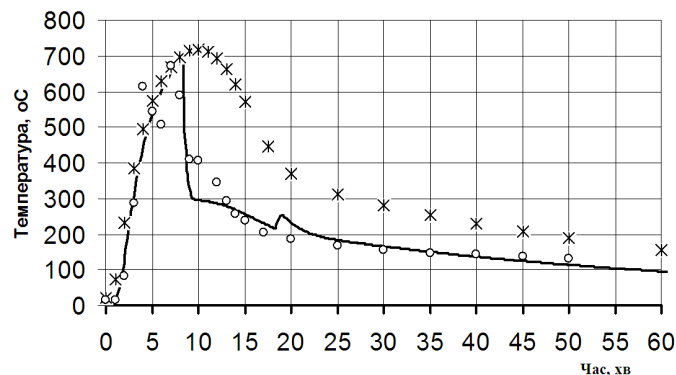
Для встановлення достовірності розрахункових даних не лише дрібно-, а й навіть великомасштабних пожеж використані відомі експериментальні дані [3], отримані при горінні деревини на довжині 25 м в штольні довжиною 180 м та площею поперечного перерізу 4 м<sup>2</sup>, що відповідає параметрам кабельного тунелю.

Порівнюючи параметри для великомасштабних та дрібномасштабних пожеж, можна впевнитися, що вони майже збігаються за винятком параметра  $k$ , який зменшується, як і передбачалося, зі збільшенням довжини зони горіння.

Наступну серію досліджень в камері було проведено при гасіння пожежі вуглекислим газом та азотом при середній швидкості повітря 0,1-0,3 м/с.

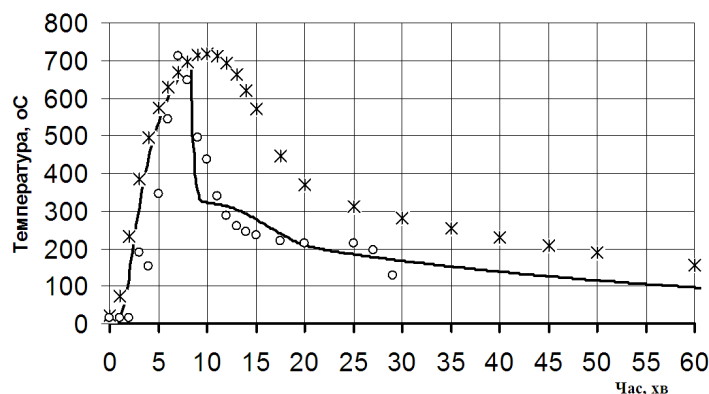
Розрахунки проводились за формулами (9), (11)–(16) у всіх випадках при числі Куранта  $Cu = 1$ ;  $\bar{q}_0 = 8$   $\bar{\gamma}_2 = 0$ ;  $\Delta x_1 = \Delta x_2 = 2$  м;  $\tau_0 = 0 - 4$  хв.

На рис. 2-5 представлено результати змінення за часом температури пожежних газів в кабельному тунелі при подачі азоту або вуглекислого газу з рециркуляцією та без рециркуляції.



**Рисунок 2** – Динаміка температури пожежі при подачі вуглекислого газу без рециркуляції (маркерами позначено експериментальні дані (x – без та o – при подачі азоту), крива лінія – дані розрахунку)

Вуглекислий газ подавався на вході в камеру, починаючи з 8 хв і до 18 хв з моменту виникнення пожежі без рециркуляції пожежних газів. Подача вуглекислого газу з концентрацією 77,5 % привела до зниження кисню на вході в камеру до 4,5 %. Припинення подачі CO<sub>2</sub> на 18 хвилині викликало (рис. 2) незначну зміну температури, після чого продовжилося її зниження.

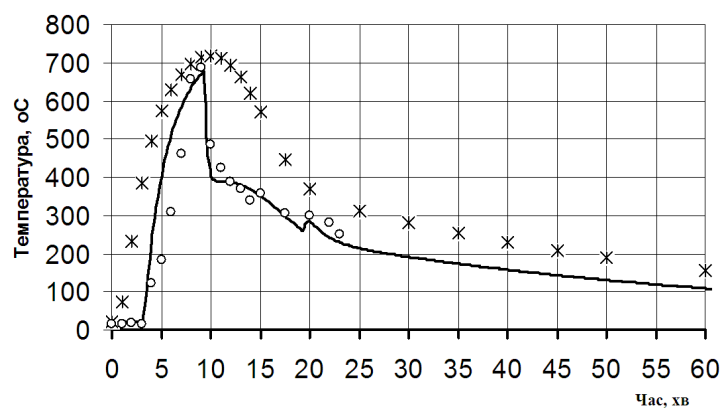


**Рисунок 3** – Динаміка температури пожежі при подачі вуглекислого газу з рециркуляцією (маркерами позначено експериментальні дані (ж – без та o – при подачі азоту), крива лінія – дані розрахунку)

Вуглекислий газ подавався на вході в камеру, починаючи з 8 хв і до 18 хв з моменту виникнення пожежі з рециркуляцією пожежних газів. Подача вуглекислого газу з концентрацією 75 % привела до зниження кисню на вході в камеру до 5 %. Зупинення подачі CO<sub>2</sub> на 18 хвилині не викликало (мал. 4) зміни температури, як до цього, що пояснюється впливом рециркуляції пожежних газів.

Як видно (рис. 2 і 3), при подачі вуглекислого газу протягом 10 хв, задоволення балансу розрахункових та експериментальних даних досягнуто при  $k = 0,003$  1/с;  $\bar{\gamma}_1 = 3$ ;  $\bar{\alpha} = 0,015$ ;  $\delta = 0,1$ .

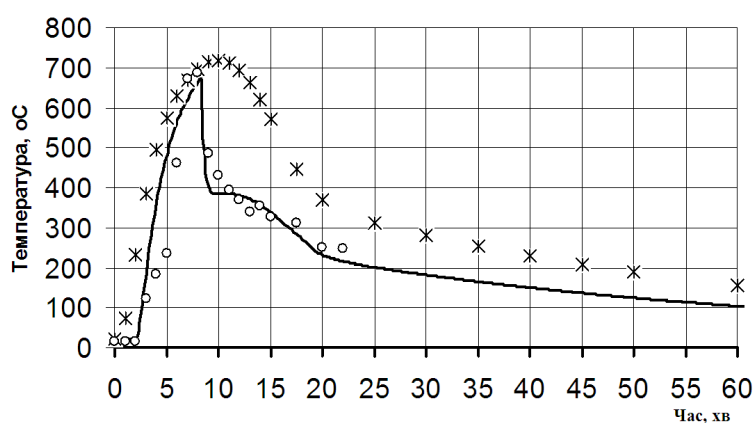
На рис. 4 представлені розрахункові та експериментальні дані гасіння дрібномасштабної пожежі азотом без рециркуляції.



**Рисунок 4** – Динаміка температури пожежі при подачі азоту без рециркуляції (маркерами позначено експериментальні дані (x – без та o – при подачі азоту), крива лінія – дані розрахунку)

Азот подавався на вході в камеру, починаючи з 8 хв і до 18 хв з моменту виникнення пожежі. Подача азоту з концентрацією 91,5 % привела до зниження кисню на вході в камеру до 8,5 %.

Як видно з рис.4, при подачі азоту протягом 10 хв без рециркуляції задовільне узгодження розрахункових та експериментальних даних досягнуто при  $k = 0,003$  1/с;  $\bar{\gamma}_1 = 3$ ;  $\bar{\alpha} = 0,015$ ;  $\delta = 0,1$ .



**Рисунок 5** – Динаміка температури пожежі при подачі азоту з рециркуляцією (маркерами позначено експериментальні дані (x – без та o – при подачі азоту), крива лінія – дані розрахунку)

Азот подавався на вході в камеру, починаючи з 8 хв і до 18 хв з моменту виникнення пожежі, після чого було ввімкнено рециркуляцію пожежних газів. Подача азоту з концентрацією 91,5 % привела до зниження кисню на вході в камеру до 8,5 %.

Як видно з рис. 5, при подачі азоту протягом 10 хв з рециркуляцією задовільне узгодження розрахункових та експериментальних даних досягнуто при  $k = 0,003$  1/с;  $\bar{\gamma}_1 = 3$ ;  $\bar{\alpha} = 0,015$ ;  $\delta = 0,1$ .

**Висновки.** Аналіз даних з гасіння пожежі в камері показує, що безпосередня подача азоту або вуглекислого газу в зону горіння приводить приблизно до однакового результату: температура до 200 °С знижується за 25 хвилин замість 45 хвилин з початку горіння. Додаткова рециркуляція лише в незначних показниках зменшує час гасіння пожежі всього на 5 хвилин. Різницю ефективності впливу на осередок пожежі того чи іншого газу можливо визначити лише при збільшенні дальності їх подачі.

Отримані результати підтверджують адекватність розробленої математичної моделі та дають змогу обґрунтувати параметри гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією.

#### 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. **Ковалишин В.В.** Математичне моделювання розвитку і гасіння пожеж різними засобами на об'єктах значної протяжності / В.В. Ковалишин. – Київ: Науковий вісник НДІПБ, 2013, №1 (27). – С. 153 – 160.
3. **Осипов С.Н.** Вентиляция шахт при подземных пожарах / С.Н. Осипов, В.М. Жадан. – М.: Недра, 1973. – 152 с.

#### References:

1. **Puzach S.V.** Methods for heat and mass exchange calculating during indoor fires and their application for fire safety problems solving / S.V. Puzach. – М.: Academy of SFS MES of Russia, 2005. – 336 p.
2. **Kovalyshyn V.V.** Mathematical modeling of fire development and extinguishing at the objects of considerable length / V.V. Kovalyshyn. – Kyiv: Scientific Bulletin of URICP, 2013, №1 (27). – P. 153 – 160.
3. **Osypov S.N.** Ventilation of mines in cases of fires / S.N. Osypov, V.M. Zhadan. – М.: Nedra, 1973. – 152 p.

