

Я.Ю. Кальченко, ад'юнкт, НУЦЗУ,  
Ю.А. Абрамов, д.т.н., проф., головн.н.с., НУЦЗУ

## МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТЕПЛОВИХ ПОЖЕЖНИХ СПОВІЩУВАЧІВ

Отримано регресійну модель для постійної часу теплових пожежних сповіщувачів при впливі на них тепловим потоком постійної величини.

**Ключові слова:** пожежний сповіщувач, постійна часу, математична модель.

**Постановка проблеми.** Одною з проблем на шляху підвищення ефективності виявлення загорянь є удосконалення системи експлуатації систем пожежної автоматики. Ефективність її роботи визначається багатьма факторами, одним з яких є якість її математичного забезпечення. Останнім часом роль цього фактору стає більш ваговою, оскільки зростає тенденція стосовно використання математичних моделей теплових пожежних сповіщувачів (далі ТПС) для побудови алгоритмів їх випробувань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У [1] приведені математичні моделі теплових пожежних сповіщувачів при впливі на них тепловим потоком. Показано, що одним із параметрів від яких залежить температура спрацьовування сповіщувачів є постійна часу їх чутливих елементів.

У [2] наведено алгоритм випробувань, що проводяться у тепловому каналі “Plunge Tunnel”, для визначення індексу часу відгуку теплових пожежних сповіщувачів максимального та максимально-диференціального типу. Показано як цей алгоритм можливо використовувати для випробувань ТПС. У публікації не приведені математичні моделі для постійної часу чутливого елемента теплового пожежного сповіщувача, визначення і порівняння якої з нормативною величиною [3], можна використовувати для проведення випробувань сповіщувачів.

У [4] приведено математичну модель та спосіб визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів, яка визначається при впливі на його чутливий елемент тепловим потоком температура якого змінюється за квадратичним законом. В роботі не наведено від яких характеристик залежить величина постійної часу та яким чином вона буде змінюватися за різних умов.

**Постановка завдання та його вирішення.** Метою роботи є побудова математичної моделі для постійної часу теплових пожежних сповіщувачів та виявлення факторів, що впливають на її величину. Температура чутливого елемента, що може бути представлений у вигляді прямокутної пластини, циліндра або шару, теплового пожежного сповіщувача при дії на нього теплового потоку  $q = const$ , описується рівнянням [5]

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = a \left[ \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2\nu + 1}{r} \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right] - m^2 [T(r, t) - T_0], \quad (1)$$

з початковими та граничними умовами

$$T(r,0) = T_0; \quad \lambda \frac{\partial T(R,t)}{\partial r} = q, \quad (2)$$

де  $a, \lambda$  – коефіцієнт температуропровідності і теплопровідність матеріалу чутливого елемента;  $T_0$  – температура навколишнього середовища;  $R$  – характерний розмір чутливого елемента;  $\nu$  – параметр, що характеризує форму чутливого елемента ( $\nu = -0,5$  – для прямокутної пластини,  $\nu = 0$  – для циліндра,  $\nu = 0,5$  – для шара);  $m^2$  – параметр, що визначається виразом

$$m^2 = \frac{2\alpha}{c\rho R}; \quad (3)$$

$\alpha$  – коефіцієнт теплопередачі;  $c, \rho$  – питома теплоємність та густина матеріалу чутливого елемента.

Внаслідок малості розмірів ЧЕ, його температуру доцільно усереднити по об'єму, після чого вона буде описуватись моделлю

$$\theta(t) = \frac{K\alpha q}{\lambda m^2 R} [1 - \exp(-m^2 t)] \quad (4)$$

де  $K = \sqrt{\frac{2}{\pi}}$  – для прямокутної пластини;  $K = 2$  – для циліндра;  $K = 3\sqrt{\frac{2}{\pi}}$  – для шара.

З урахуванням (3), а також співвідношення  $a = \lambda(c\rho)^{-1}$ , модель (4) приймає вигляд

$$\theta(t) = \frac{0,5Kq}{\alpha} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2\alpha}{c\rho R} t\right) \right], \quad (5)$$

де параметр  $\alpha$  визначається за допомогою критеріального рівняння [6]

$$\alpha = d_1 \lambda_0 l^{-1} \text{Re}^{d_2} \text{Pr}_1^{d_3} \left( \frac{\text{Pr}_1}{\text{Pr}_2} \right)^{0,25}. \quad (6)$$

У рівнянні (6)  $\lambda_0$  – теплопровідність повітряного середовища;  $l$  – довжина чутливого елемента (для шара  $l = R$ );  $\text{Re}, \text{Pr}_1, \text{Pr}_2$  – число Рейнольдса та число Прандтля при температурі повітряного потоку, що надходить до чутливого елемента, та при температурі поверхні чутливого елемента відповідно;  $d_i$  – параметри, значення яких приведені в [5].

Динамічні властивості теплового пожежного сповіщувача повністю визначаються його передаточною функцією. Передаточну функцію теплового пожежного сповіщувача із урахуванням (5) можна представити у вигляді

$$W(p) = \frac{0,5K}{\alpha} (\tau p + 1)^{-1}, \quad (7)$$

де  $p$  – комплексне число, а  $\tau$  – постійна часу ТПС, яка описується формулою

$$\tau = \frac{c\rho R}{2\alpha}. \quad (8)$$

Постійна часу є частною характеристикою ТПС та залежить від характеристик ЧЕ, середовища, а також умов проведення випробувань. Для визначення залежності величини постійної часу від інших характеристик доцільно перейти до її регресійної моделі.

Для побудови регресійної моделі постійної часу ТПС було сплановано обчислювальний експеримент. Залежність постійної часу ТПС від його характерного розміру, швидкості теплового потоку та діаметра труби по якому він надходить можна представити, як аналітичний вираз

$$y = f(R, V, d_{\text{тр}}). \quad (9)$$

Вираз (9) можна представити у вигляді обмеженого полінома

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ijz} x_i x_j x_z, \quad (10)$$

де  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ijz}$  – вибіркові коефіцієнти регресії, що будуть отримані в результаті чисельного експерименту,  $x_i, i = \overline{1,3}$  – кодовані змінні, що зв'язані з фізичними величинами  $R, V, d_{\text{тр}}$  наступним чином

$$x_1 = \frac{R - R_0}{\delta R}; \quad x_2 = \frac{V - V_0}{\delta V}; \quad x_3 = \frac{d_{\text{тр}} - d_{\text{тр}0}}{\delta d_{\text{тр}}}, \quad (11)$$

де  $R_0, V_0, d_{\text{тр}0}$  – значення факторів на нульовому рівні;  $\delta R, \delta V, \delta d_{\text{тр}}$  – інтервали варіювання факторів, величини яких приведені в табл. 1.

Для даного експерименту модель (10) трансформується до вигляду

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{23} x_2 x_3 + b_{31} x_3 x_1 + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (12)$$

**Табл. 1. Рівні варіювання факторів**

Фактори	Позначення	Нульовий рівень $x_i = 0$	Інтервал варіювання	Максимальний рівень $x_i = 1$	Мінімальний рівень $x_i = -1$
Характерний розмір ЧЕ ТПС, $R$ , мм	$x_1$	0,75	0,25	1	0,5
Діаметр труби $d_{тр}$ , м	$x_2$	0,2	0,1	0,3	0,1
Швидкість теплового потоку, $V$ , м/с	$x_3$	0,8	0,2	1,0	0,6

Обчислювальний експеримент був проведений за умов, що наведені у табл. 2 та табл. 3. Реалізація плану експерименту наведена в табл. 4 у вигляді розширеної матриці, яка дозволяє оцінити коефіцієнти регресії при взаємодіючих факторах.

**Табл. 2. Характеристики системи**

Площа перерізу повітряного екрану, $m^2$	0,0090
Швидкість повітряного потоку, $\frac{m}{c}$	0,5000
Теплопровідність повітряного середовища, $\frac{Вт}{(м \cdot ^\circ C)}$	0,0257
Густина повітря, $\frac{кг}{м^3}$	1,2040
Початкова температура повітря, $^\circ C$	25,0000

**Табл. 3. Характеристики ЧЕ**

Густина, $\frac{кг}{м^3}$	8930
Радіус, $мм$	0,5
Довжина, $мм$	5
Питома теплоємність, $\frac{Дж}{(кг \cdot ^\circ C)}$	381

Після проведення випробувань та обчислення коефіцієнтів регресії, регресійна модель (12) приймає вигляд

$$y = f(x_1, x_2, x_3) = 5,084 + 1,57 \cdot x_1 - 1,72 \cdot x_2 - 0,69 \cdot x_3 + 0,635 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,337 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,35 \cdot x_3 \cdot x_1 - 0,005 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (13)$$

Графічна інтерпретація моделі (13) наведена на рис. 1.

Табл. 4. Матриця планування експерименту

m	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_3x_2$	$x_1x_3$	$x_1x_2x_3$	$y, c$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	3,97
2	1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	2,69
3	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	7,68
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	3,84
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	5,39
6	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	2,69
7	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	10,43
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	5,21
9	+1	0	0	0	0	0	0	0	4,34
10	+1	+1,4	0	0	0	0	0	0	6,37
11	+1	-1,4	0	0	0	0	0	0	2,31
12	+1	0	+1,4	0	0	0	0	0	3,16
13	+1	0	-1,4	0	0	0	0	0	8,94
14	+1	0	0	+1,4	0	0	0	0	3,62
15	+1	0	0	-1,4	0	0	0	0	5,62
$\sum_{i=1}^N x_i^2$	15	11,92	11,92	11,92	8	8	8	8	

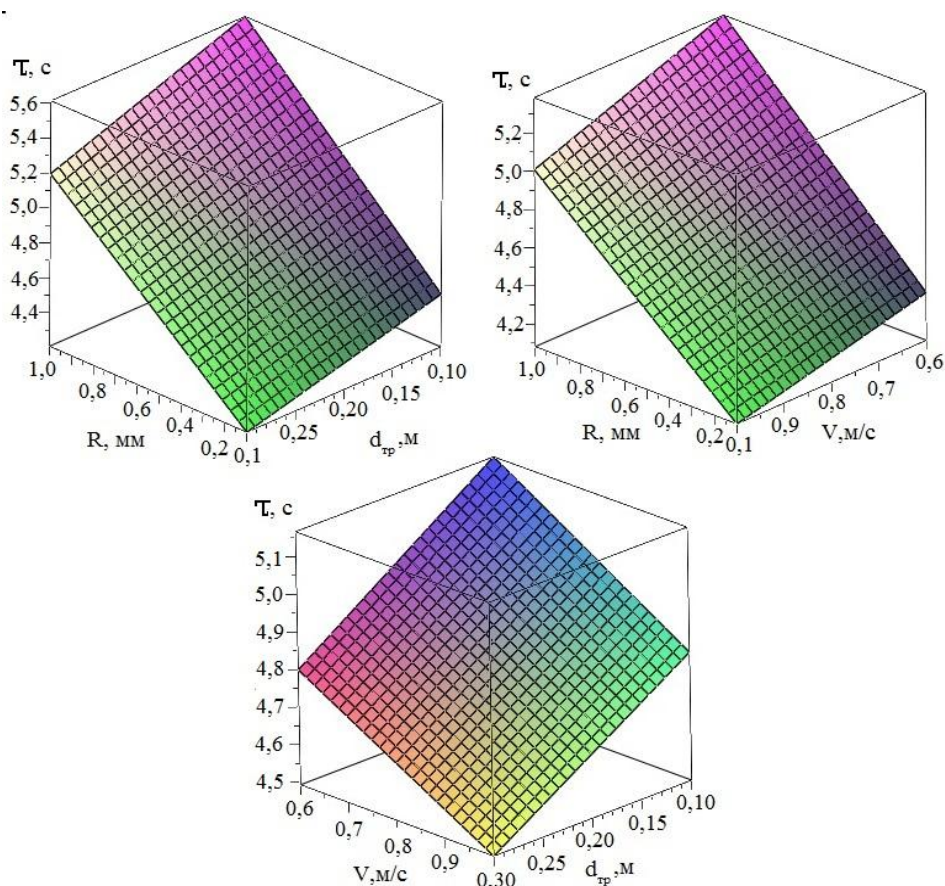


Рис. 1. Залежність постійної часу ТПС від швидкості теплового потоку, характерного розміру чутливого елемента та діаметра труби відповідно до регресійної моделі

**Висновки.** Побудовано аналітичний вираз для постійної часу сповіщувача у вигляді регресійної моделі, факторами якого є характерний розмір чутливого елемента сповіщувача, діаметр труби, по якій рухається-

ся тепловий потік, та швидкість його руху. Показано, що величина постійної часу в більшій мірі буде залежати від характерного розміру ЧЕ ТПС, причому прямо пропорційно. За умов, що  $d_{mp} = 0,3$  м, а  $V = 0,8$  м/с постійна часу при зростанні характерного розміру ЧЕ  $R$  від  $0,1$  мм до  $1$  мм зростає на  $0,98$  с. Від швидкості теплового потоку та діаметру труби постійна часу ТПС залежить обернено пропорційно, але не так вагомо як від характерного розміру. Для даних інтервалів варіювання при збільшенні  $d_{mp}$  в три рази величина постійної часу зменшиться лише на  $0,35$  с, а при збільшенні  $V$  з  $0,6$  м/с до  $1,0$  м/с зменшиться лише на  $0,31$  с.

## ЛІТЕРАТУРА

1. LI Qiang. Estimation of Fire Detection Time. In: R. The 5th Conference on Performance-based Fire and Fire Protection Engineering: Procedia Engineering, 2011. pp. 233–243.

2. Bob Elliott. Response Time Index Testing (RTI) or Methodology for Heat Detection [Электронный ресурс] / В. Elliott. – Электрон. текстовые дан. – Boston, 2006. – Режим доступа: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Resources/Research-Foundation/foundation-proceedings/elliott2.ashx?la=en&hash=DFE50C4D7EC5B8B0D37ED841A5620F9BAA438B7>.

3. ДСТУ EN54-5-2003. Системи пожежної сигналізації. Частина 5. Сповіщувачі пожежні теплові точкові. – [Чинний від 2003-16-12]. – К.: Держжспоживстандарт України, 2004. – 164 с. – (Національні стандарти України).

4. Пат. 110086 Україна, МПК G08B 17/06. Спосіб визначення постійної часу теплових пожежних сповіщувачів / Абрамов Ю.О., Кальченко Я.Ю., Лісняк А.А.; заявник і власник патенту Національний університет цивільного захисту України. – № а 2014 13822; заявл. 23.12.2014; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 21.

5. Абрамов Ю.А. Математическое обеспечение тестирования тепловых пожарных извещателей / Ю.А. Абрамов, Я.Ю. Кальченко // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: НУГЗУ, 2016. – Вып. 40. – С 5–11.

6. Рябова І.Б. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі / І.Б. Рябова, І.В. Сайчук, А.Я. Шаршанов. – Х.: АПБУ, 2002. – 332 с.

*Отримано редколегією 10.03.2018*

Я.Ю. Кальченко, Ю.А. Абрамов

### **Математические модели тепловых пожарных извещателей**

Получена регрессионная модель для постоянной времени теплового пожарного извещателя при воздействии на него тепловым потоком постоянной величины.

**Ключевые слова:** пожарный извещатель, постоянная времени, математическая модель.

Y. Kalchenko, Y. Abramov

### **Mathematical models of thermal fire detectors**

The regression model of the time constant of the thermal fire detector which was subjected by constant heat flux was obtained.

**Keywords:** fire detector, time constant, mathematical model.