

Ю. О. Абрамов, д.т.н., професор, головн. н.с., НУЦЗУ,
Є. О. Тищенко, к.т.н., доцент, нач. каф., ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ,
Я. Ю. Кальченко, ад'юнкт, НУЦЗУ

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ МОБІЛЬНОЮ ПОЖЕЖНОЮ УСТАНОВКОЮ

Одержана оцінка часу гасіння пожежі класу В розпиленою водою, яка є рішенням трансцендентного рівняння.

Ключові слова: пожежа класу В, розпилена вода, мобільна установка, моделі елементів мобільної установки.

Постановка проблеми. Одним із напрямків, що пов'язані, із підвищенням ефективності гасіння пожеж, є автоматизація таких технологічних процесів. Реалізація процесів автоматизації може здійснюватись за двома напрямками – із використанням стаціонарних або нестационарних (мобільних) засобів пожежогасіння [1]. Мобільні засоби пожежогасіння є більш гнучкими стосовно тактичних можливостей, внаслідок чого вони привертають більше уваги при вирішенні проблеми стосовно підвищення ефективності гасіння пожеж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Принципи побудови та характеристики одного із перспективних класів мобільних засобів пожежогасіння наведені в [1]. Але автор не наводить інформацію стосовно їх динамічних властивостей. В останній час з'явився новий тип мобільних засобів пожежогасіння, в основі якого лежить використання сігвеїв [2]. В [3] наведені математичні моделі елементів такої мобільної пожежної установки та одержані оцінки часу гасіння пожежі класу В за умови, що в якості вогнегасної речовини використовується вогнегасний порошок. Якщо в якості вогнегасної речовини використовується інший склад, то це буде впливати на характер формалізації процесу взаємодії вогнегасної речовини із осередком горіння [4]. Це обумовлює необхідність враховувати математичні моделі пожежі для кожного типу вогнегасної речовини при визначенні оцінок процесу пожежогасіння.

Постановка завдання та його вирішення. Метою роботи є створення математичної моделі для одержання оцінок часу гасіння пожежі класу В мобільною пожежною установкою при використанні в якості вогнегасної речовини розпиленої води.

Якщо в якості мобільної пожежної установки використовується установка на базі сігвею [2], то її динамічні властивості будуть визначатись динамічними властивостями пневмо-гідромагістралей та ємністю для вогнегасної речовини [3]. Крім того, при гасінні пожежі необхідно враховувати динамічні властивості пожежі, а також процес подачі вогнегасної

речовини від мобільної пожежної установки до осередку горіння [5].

В загальному випадку, тобто незалежно від типу вогнегасної речовини, динамічні властивості процесу гасіння пожежі мобільною пожежною установкою описуються передаточною функцією, яка має вигляд:

$$W(p) = \prod_{i=1}^N W_i(p), \quad (1)$$

де $W_i(p)$ – передаточна функція i -го елемента системи пожежогасіння.

Для пневмомагістралі ($i=1$) має місце [6]

$$W_1(p) = K_1 \exp(-\tau_1 p), \quad (2)$$

де K_1, τ_1 – коефіцієнт передачі та час запізнення пневмомагістралі. Для характерних параметрів величина τ_1 складає 4,0 мс.

Рух вогнегасної речовини в ємкості описується диференціальним рівнянням [3]

$$\rho H \frac{dU}{dt} + 0,5 \rho (1 + \mu) (SF^{-1})^2 U^2 = P, \quad (3)$$

де ρ – щільність вогнегасної речовини; H – висота ємності; S – площа торця ємності; U – швидкість руху вогнегасної речовини; F – площа отвору; μ – коефіцієнт, який враховує опір отвору ємності; P – тиск на вході в ємність.

Після лінеаризації диференціального рівняння (3) воно трансформується до вигляду

$$\tau_2 \frac{d\delta U}{dt} + \delta U = K_2 \delta P, \quad (4)$$

якому буде відповідати передаточна функція

$$W_2(p) = K_2 (\tau_2 p + 1)^{-1}, \quad (5)$$

де

$$\begin{aligned} K_2 &= [\rho (1 + \mu) U_0 (SF^{-1})^2]^{-1}; \\ \tau_2 &= H [(1 + \mu) U_0]^{-1} (FS^{-1})^2; \\ U_0 &= 0,85 (2P\rho^{-1})^{0,5} FS^{-1}. \end{aligned} \quad (6)$$

При $H = 0,5$ м; $P = 0,4$ МПа; $FS^{-1} = 1,7 \cdot 10^{-3}$; $\rho = 10^3$ кг·м⁻³ $\mu = 0,5$; величина постійної часу $\tau_2 = 0,5$; має порядок 25 мкс.

Гідромагістраль має передаточну функцію [3]

$$W_3(p) = \exp(-\tau_3 p), \quad (7)$$

де τ_3 – час запізнення, вираз для якого має вигляд

$$\tau_3 = (\rho B^{-1})^{0.5} L. \quad (8)$$

В (8) B – модуль об'ємної пружності вогнегасної речовини; L – довжина гідро магістралі. Для характерних параметрів величина τ_3 має порядок 1,0 мс.

Передаточна функція, яка відображає властивості руху вогнегасної речовини від мобільної пожежної установки до осередку горіння, згідно [3, 5] має вигляд

$$W_4(p) = K_4 \exp(-\tau_4 p), \quad (9)$$

де K_4, τ_4 – коефіцієнт передачі та час запізнення. Для параметра τ_4 має місце

$$\tau_4 = (2hg^{-1})^{0.5}, \quad (10)$$

де h – висота, з якої подається вогнегасна речовина; g – прискорення сили тяжіння. При $h=1,0$ м $\tau_4 \cong 0,45$ с.

Якщо в якості вогнегасної речовини використовується розпилена вода, то передаточна функція пожежі класу В буде мати вигляд [4, 5]

$$W_5(p) = K_5 (\tau_5 p + 1)^{-0.5}, \quad (11)$$

де K_5, τ_5 – коефіцієнт передачі та постійна часу пожежі.

Згідно (1) гасіння пожежі такого типу за допомогою розглядаємої мобільної установки буде мати опис у вигляді

$$W(p) = K [(\tau_2 p + 1)(\tau_5 p + 1)^{0.5}]^{-1} \exp[-(\tau_1 + \tau_3 + \tau_4)p], \quad (12)$$

де $K = \prod_{i=1}^5 K_i$.

Час гасіння t_T пожежі мобільною установкою визначається рішенням трансцендентного рівняння

$$\theta(t_T) - \theta_T = 0, \quad (13)$$

де

$$\theta(t) = L^{-1} [W(p)(KPp)^{-1}] \quad (14)$$

$$\theta_T = (T_K - T_T)(KP(T_K - T_0))^{-1}, \quad (15)$$

де L^{-1} – оператор зворотного перетворення Лапласа; P – тиск на вході

пневмомагістралі; T_K – температура кипіння рідини, що горить; T_T – температура гасіння, T_0 – температура навколишнього середовища.

Для більшості вуглеводів має місце [7]

$$\theta_T \leq 0,15. \quad (16)$$

Вираз (14) можна записати наступним чином

$$\theta(t) = L^{-1} [W_1(p)W_2(p)\exp[-(\tau_1 + \tau_3 + \tau_4)p]], \quad (17)$$

де

$$W_1(p) = [p(\tau_2 p + 1)]^{-1}; \quad (18)$$

$$W_2(p) = [(\tau_5 p + 1)]^{0,5}. \quad (19)$$

Внаслідок того, що [8]

$$W_1(t) = L^{-1} [W_1(p)] = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right); \quad (20)$$

$$W_2(t) = L^{-1} [W_2(p)] = (\pi\tau_5 t)^{-0,5} \exp\left(-\frac{t}{\tau_5}\right), \quad (21)$$

то згідно до теореми Бореля [9] можна записати

$$\begin{aligned} W(t) &= (\pi\tau_5)^{-0,5} \int_0^t \left[1 - \exp\left(-\frac{t-\tau}{\tau_2}\right)\right] \tau^{-0,5} \exp\left(-\frac{t}{\tau_5}\right) d\tau = \\ &= (\pi\tau_5)^{-0,5} \left[\int_0^t \tau^{-0,5} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_5}\right) d\tau - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \int_0^t \tau^{-0,5} \exp\left(\frac{\tau_5 - \tau_2}{\tau_2 \tau_5} \tau\right) d\tau \right]. \end{aligned} \quad (22)$$

Для першого інтегралу має місце [10]

$$\int_0^t \tau^{-0,5} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_5}\right) d\tau = (\pi\tau_5)^{0,5} \operatorname{erf}\left(\frac{t}{\tau_5}\right). \quad (23)$$

Для другого інтегралу буде мати місце [10]

$$\int_0^t \tau^{-0,5} \exp\left(\frac{\tau_5 - \tau_2}{\tau_2 \tau_5} \tau\right) d\tau = \left(\frac{\pi\tau_2 \tau_5}{\tau_5 - \tau_2}\right)^{0,5} \operatorname{erfi}\left(\frac{\tau_5 - \tau_2}{\tau_2 \tau_5} t\right). \quad (24)$$

Врахування (23) та (24) трансформує вираз (22) наступним чином

$$W(t) = \operatorname{erf}\left(\frac{t}{\tau_5}\right)^{0,5} - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)\left(\frac{\tau_2}{\tau_5 - \tau_2}\right)^{0,5} \operatorname{erfi}\left(\frac{\tau_5 - \tau_2}{\tau_2 \tau_5} t\right)^{0,5}, \quad (25)$$

що дає можливість представити вираз (17) у вигляді

$$\begin{aligned} \theta(t) &= W(t - \tau_1 - \tau_3 - \tau_4) = \\ &= \operatorname{erf}\left(\frac{t - \tau_1 - \tau_3 - \tau_4}{\tau_5}\right)^{0,5} - \exp\left(-\frac{t - \tau_1 - \tau_3 - \tau_4}{\tau_2}\right) \times \\ &\times \left(\frac{\tau_2}{\tau_5 - \tau_2}\right)^{0,5} \operatorname{erfi}\left[\frac{\tau_5 - \tau_2}{\tau_2 \tau_5} (t - \tau_1 - \tau_3 - \tau_4)\right]^{0,5}. \end{aligned} \quad (26)$$

На рис. 1 наведена графічна інтерпретація розв'язання трансцендентного рівняння (13) за умови, що $\theta_T = 0,15$, $\tau_5 = 100$ с.

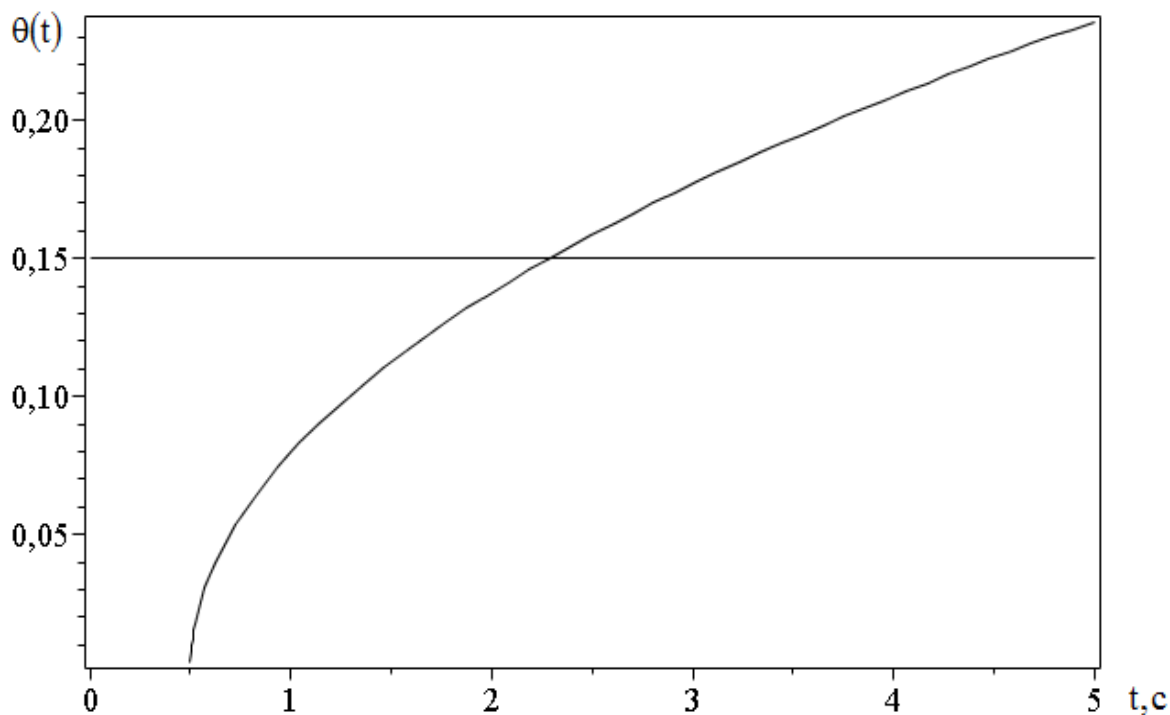


Рис. 1. Графічне вирішення рівняння (13)

Із рис. 1 витікає, що час гасіння пожежі для наведених величин параметрів функції (26) складає 2,3 с.

Висновки. Одержана узагальнена модель, яка описує процес гасіння пожежі класу В розпиленою водою за допомогою мобільної установки. Використання такої моделі дозволяє одержувати оцінки часу гасіння пожеж такого класу у вигляді рішення трансцендентного рівняння, параметрами якого служать постійні часу та часи запізнення елементів мобільної пожежної установки, пожежі та простору від такої установки до осередку горіння.

ЛІТЕРАТУРА

1. Горбань Ю. И. Пожарные работы и ствольная техника в пожарной автоматике и пожарной охране. Харьков. Пожнаука, 2013. 352 с.
2. Мобільна пожежна установка: пат. 124924 Україна. №201711464; заявл. 23.11.2017; опубл. 25.04.2018. 4 с.
3. Хижняк А. А., Абрамов Ю. О., Тищенко Є. О. Моделі пожежогасіння при використанні мобільної установки // Проблеми пожарной безопасности. 2019. Вып. 46. С. 193–198.
4. Абрамов Ю., Басманов А. Модели и характеристики процесса тушения пожаров класса В // Saerbrucken: LAP Lambert Academic Publishing. 2017. 185 p.
5. Садковий В. П., Абрамов Ю. А. Теоретические основы автоматического тушения пожаров класса В распыленной водой. Харьков. 2010. 267 с.
6. Дмитриев В. Н., Градецкий В. Г. Основы пневмоавтоматики. Москва. Высшая школа. 1973. 360 с.
7. Корольченко А. Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Москва. Пожнаука, 2000. Т.1. 709 с.
8. Бейтмен Г., Эрдейн А. Таблицы интегральных преобразований. Преобразования Фурье, Лапласа, Мелмана. Москва. Наука, 1969. 342 с.
9. Абрамов Ю. А., Йохвидович Н. Ю., Червяков П. С. Операционное исчисление. Харьков. ХВПТУ. 1993. 36 с.
10. Прудников А. П., Брычков Ю. А., Марычев О. Н. Интегралы и ряды. Москва. Наука, 1981. 806 с.

Ю. О. Абрамов, Є. О. Тищенко, Я. Ю. Кальченко

Определение времени тушения пожара мобильной пожарной установкой

Получена оценка времени тушения пожара класса В распылённой водой, которая является решением трансцендентного уравнения.

Ключевые слова: пожар класса В, распыленная вода, мобильная установка, модели элементов мобильной установки.

Y. Abramov, E. Tishchenko, Y. Kalchenko

Determination of the time of extinguishing a fire with a mobile fire engine

An estimate for the time to extinguish a class B fire with sprayed water, which is a solution to the transcendental equation was obtained.

Keywords: class B fire, spray water, mobile unit, mobile unit models.