УДК 614.8

Ю.А. Абрамов, д.т.н., проф., главн.н.с., НУГЗУ,
Е.А. Тищенко, к.т.н., доцент, НУГЗУ,
А.А. Хижняк, адъюнкт, НУГЗУ

МОДЕЛЬ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА

Решена задача по формализации процесса тушения пожара класса В, решение которой получено с использованием уравнения диффузии.

Ключевые слова: пожар, тушение, математическое описание, скорость реакции.

Постановка проблемы. Эффективность тушения пожара во многом определяется степенью изученности процессов, протекающих при его реализации. Одной из проблем при этом является формализация процесса тушения пожара.

Анализ последних исследований и публикаций. Достаточно полно решение задач по формализации процессов обнаружения, локализации и тушения пожаров приведено в монографии [1]. При формализации пожаров используются как теоретические методы [2, 3], так и экспериментальные [4, 5]. Модели, описывающие процессы тушения пожаров, достаточно часто предполагают использование экспериментальных данных [6]. Следует отметить, что в большей степени при решении задач по формализации процессов тушения пожаров представлен класс математических моделей, в которых предполагается использование в качестве огнетушащего вещества воды.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является построение модели тушения пожара класса В с использованием порошковых огнетушащих веществ.

Если для тушения пожара класса В используются дисперсные частицы, концентрация которых превышает критическое значение, то формализация такого процесса может быть представлена следующим образом

$$\rho c V \frac{dT}{dt} = q_1 - q_2, \tag{1}$$

где ρ, c – плотность и удельная теплоемкость пламени соответственно; V – объем пламени; T – температура пламени; q_1 – скорость выделения тепла в области пламени; q_2 – скорость потерь тепла от пламени в окружающее пространство.

Для q_1 и q_2 имеет место

$$q_1 = QUV;,\ q_2 = \alpha S(T - T_0), \tag{2}$$

где Q – тепловой эффект реакции; U – скорость реакции; α – коэффициент теплоотдачи, учитывающий потери тепла за счет конвекции и за счет излучения; S – площадь поверхности пламени; T_0 – температура окружающей среды.

Уравнение (1) можно переписать следующим образом

$$\tau \frac{d\theta}{dt} + \theta = T_н - T_0 - QUh\alpha^{-1}, \tag{3}$$

где $\theta = T_н - T$; $V = Sh$; $\tau = \rho c h \alpha^{-1}$; $T_н$ – начальная температура; h – толщина пламени.

Скорость реакции U определяется выражением

$$U = (\Delta t \cdot h)^{-1} \int_0^h \mu(x) dx, \tag{4}$$

где $\mu(x)$ – концентрация активных центров; Δt – время жизни активных центров.

Концентрация активных центров определяется решением уравнения диффузии

$$D \frac{d^2\mu}{dx^2} - A\mu + \eta = 0; \tag{5}$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} x = 0;\ \ \mu = 0; \\ x = h;\ \ \mu = 0, \end{aligned} \tag{6}$$

где D – коэффициент диффузии; A – константа, характеризующая скорости обрыва цепей в объеме пламени при соударении с молекулами реагирующей смеси – a_1; скорости обрыва цепей на поверхности дисперсных частиц порошкового состава – a_2 и скорости разветвления цепей a_3; x – координата в направлении к границе пламени; η – число активных центров, образованное в единицу времени в единичном объеме пламени.

Решение уравнения (5) представим в виде двух аддитивных составляющих

$$\mu_1 = C_1 \exp(\lambda x) + C_2 \exp(-\lambda x); \qquad \mu_2 = -C_3 A, \tag{7}$$

где $C_i, i = \overline{1,3}$ – постоянные интегрирования; $\lambda = \left(AD^{-1}\right)^{0,5}$ – модуль корней характеристического уравнения.

Для постоянной C_3 имеет место

$$C_3 = \eta A^{-1}, \tag{8}$$

а постоянные C_1 и C_2 определяются решениями системы алгебраических уравнений, которая строится на основании условий (6). Эти решения имеют вид

$$C_1 = \eta[1 - \exp(-\lambda h)][A[\exp(-\lambda h) - \exp(\lambda h)]]^{-1};. \tag{9}$$

$$C_2 = -C_1. \tag{10}$$

Тогда решение дифференциального уравнения (5) с граничными условиями (6) будет иметь вид

$$\mu = \eta A^{-1}\begin{bmatrix} 1 + [\exp(-\lambda h) - \exp(\lambda h)]^{-1} \times \\ \times [[1 - \exp(-\lambda h)]\exp(\lambda x) - [1 - \exp(\lambda h)]\exp(-\lambda x)] \end{bmatrix}. \tag{11}$$

Учтем соотношения

$$\begin{aligned} 1 - \exp(-\lambda h) &= 1 - \exp\left(-\lambda \frac{h}{2}\right)\exp\left(-\lambda \frac{h}{2}\right) = \\ &= \exp\left(-\lambda \frac{h}{2}\right)\left[\exp\left(\lambda \frac{h}{2}\right) - \exp\left(-\lambda \frac{h}{2}\right)\right] = \\ &= 2\exp\left(-\lambda \frac{h}{2}\right)\mathrm{sh}\lambda \frac{h}{2}; \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} 1 - \exp(\lambda h) &= 1 - \exp\left(\lambda \frac{h}{2}\right)\exp\left(\lambda \frac{h}{2}\right) = \\ &= \exp\left(\lambda \frac{h}{2}\right)\left[\exp\left(-\lambda \frac{h}{2}\right) - \exp\left(\lambda \frac{h}{2}\right)\right] = \\ &= -2\exp\left(\lambda \frac{h}{2}\right)\mathrm{sh}\lambda \frac{h}{2}. \end{aligned} \tag{13}$$

С учетом соотношений (12) и (13) для слагаемых, стоящих в квадратных скобках решения (11), можно записать

$$\begin{aligned} &[1 - \exp(-\lambda h)][\exp(-\lambda h) - \exp(\lambda h)]^{-1}\exp(\lambda x) = \\ &= -2\exp\left(-\lambda \frac{h}{2}\right)\exp(\lambda x)\mathrm{sh}\lambda \frac{h}{2}[\exp(\lambda h) - \exp(-\lambda h)]^{-1} = \\ &= -\mathrm{sh}\lambda \frac{h}{2}\exp\left[\lambda\left(x - \frac{h}{2}\right)\right](\mathrm{sh}\lambda h)^{-1}; \end{aligned} \tag{14}$$

$$\left[1-\exp(\lambda h)\right]\left[\exp(-\lambda h)-\exp(\lambda h)\right]^{-1}\exp(-\lambda x)=$$
$$=2\exp\left(\lambda\frac{h}{2}\right)\exp(-\lambda h)\mathrm{sh}\lambda\frac{h}{2}\left[\exp(\lambda h)-\exp(-\lambda h)\right]^{-1}= \tag{15}$$
$$=\mathrm{sh}\lambda\frac{h}{2}\exp\left[-\lambda\left(x-\frac{h}{2}\right)\right](\mathrm{sh}\lambda h)^{-1}.$$

После подстановки (14) и (15) в решение (11) получаем

$$\mu=\eta A^{-1}\left[1-\mathrm{sh}\lambda\frac{h}{2}\left[\exp\left[\lambda\left(x-\frac{h}{2}\right)\right]+\exp\left[-\lambda\left(x-\frac{h}{2}\right)\right](\mathrm{sh}\lambda h)^{-1}\right]\right]=$$
$$=\eta A^{-1}\left[1-2\mathrm{sh}\lambda\frac{h}{2}\mathrm{ch}\left[\lambda\left(x-\frac{h}{2}\right)\right]\left[2\mathrm{sh}\lambda\frac{h}{2}\mathrm{ch}\lambda\frac{h}{2}\right]^{-1}\right]= \tag{16}$$
$$=\eta A^{-1}\left[1-\mathrm{ch}\left[\lambda\left(x-\frac{h}{2}\right)\right]\left(\mathrm{ch}\lambda\frac{h}{2}\right)^{-1}\right].$$

Для определения скорости реакции U подставим выражение (16) в (4), в результате чего получим

$$U=\eta(\Delta tAh)^{-1}\int_0^h\left[1-\mathrm{ch}\left[\lambda\left(x-\frac{h}{2}\right)\right]\left(\mathrm{ch}\lambda\frac{h}{2}\right)^{-1}\right]dx=$$
$$=\eta(\Delta tAh)^{-1}\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}}\left[1-\mathrm{ch}\lambda y\left(\mathrm{ch}\lambda\frac{h}{2}\right)^{-1}\right]dy=$$
$$=\eta(\Delta tAh)^{-1}\left[y-\mathrm{sh}\lambda y\left(\lambda\mathrm{ch}\lambda\frac{h}{2}\right)^{-1}\right]_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}}= \tag{17}$$
$$=\eta(\Delta tA)^{-1}\left[1-\mathrm{th}\lambda\frac{h}{2}\left(\lambda\frac{h}{2}\right)^{-1}\right].$$

На рис.1 приведены зависимости

$$\mu_*=A\eta^{-1}\mu;\qquad U_*=\Delta tAh\eta^{-1}U,$$

полученные для $h=10^{-3}$ м [7] и при $\lambda=9{,}5\cdot10^3\text{м}^{-1}$ (зависимости 3 и 6); $\lambda=12{,}5\cdot10^3\text{м}^{-1}$ (зависимости 2 и 5); $\lambda=15{,}5\cdot10^3\text{м}^{-1}$ (зависимости 1 и 4).

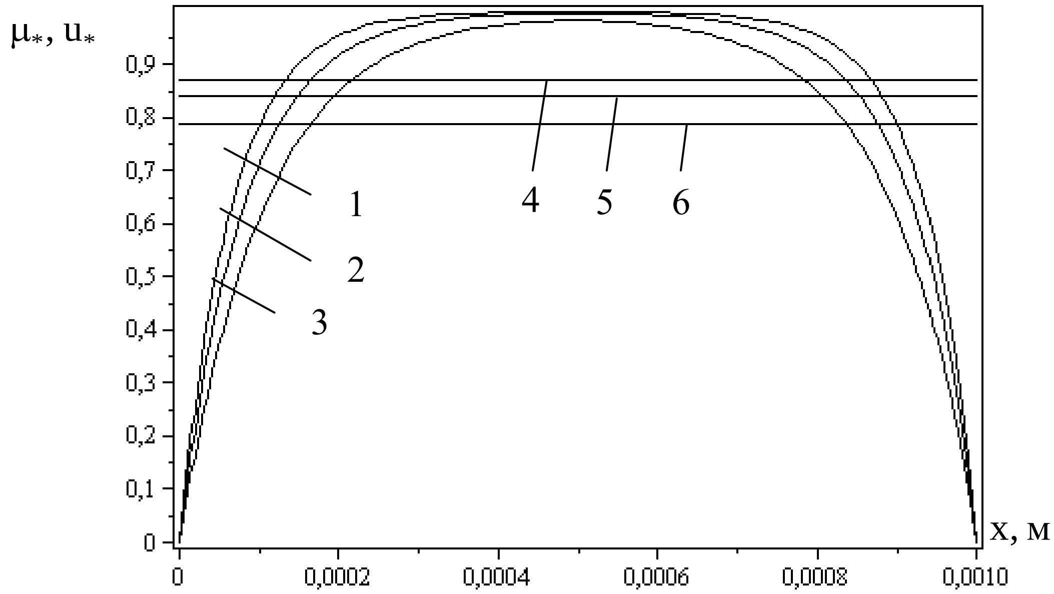

Рис. 1. Зависимости $\mu_* = \mu_*(x) - 1 \div 3$ **и** $U_* = U_*(x) - 4 \div 6$: $1{,}4 - \lambda = 15{,}5 \cdot 10^3 м^{-1}$; $2{,}5 - \lambda = 12{,}5 \cdot 10^3 м^{-1}$; $3{,}6 - \lambda = 9{,}5 \cdot 10^3 м^{-1}$

Из анализа зависимостей $U_*(x)$ следует, что имеет место

$$\mathrm{th}\lambda \frac{h}{2} << \lambda \frac{h}{2} \tag{18}$$

и с ростом величины λ это неравенство усиливается.

Выводы. Применительно к пожарам класса В при их тушении порошковыми огнетушащими веществами получено описание таких процессов, которое представлено в виде дифференциальных уравнений. Показано, что скорость реакции, обусловленная гибелью активных центров на поверхности дисперсных частиц, определяется решением уравнения диффузии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А. Моделирование пожаров, их обнаружения локализации и тушения [Текст] / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов, А.А. Тарасенко. – Х.:НУГЗУ, 2011. – 927 с.

2. Jahn W. The effects of models parameters on the simulation of free dynamics [Text] / W. Jahn, G. Rein, J.L. Torero // Fire Safety Science. 2008. – V.9. – P. 1341-1352.

3. Nevdakh, V.V. Initial stage simulation of stationary faming fire in the closed compartment [Text] / V.V. Nevdakh, A.A. Antoshin, I.E. Zuikov // Nauka i Tekhnika. 2014. – №3. – P. 28-35 (in Russian).

4. Thomas, I.R. The effect of fuel quantity and location on small enclosure fires [Text] / I.R. Thomas, K.A. M. Moinuddin, I.D. Bennets // Journal of Fire Protection Engineering. 2007. – V. 17. №2. – P. 85-102.

5. Beard, A.N. Flashover and boundary properties [Text] / A.N. Beard // Fire Safity Journal. 2010. – V. 45. – № 2. – P. 116-121.

6. Драздейл Д. Введение в динамику пожаров [Текст]. / Д. Драздейл. – М.: Стройиздат, 1990. – 421 с.

7. Фристром Р.Н. Структура ламинарных пламен [Текст] / Р.Н. Фристром. – М.: ИИЛ, 1961. – 180 с.

Получено редколлегией 9.03.2018

Ю.О. Абрамов, Є.О. Тищенко, А.А. Хижняк

Модель гасіння пожежі

Розв’язана задача по формалізації процесу гасіння пожежі класу В, розв’язання якої одержано із використанням рівняння дифузії.

Ключові слова: пожежа, гасіння, математичний опис, швидкість реакції.

Y. Abramov, E. Tischenko, A. Khizhnyak

Fire extinguishing model

The task of formalizing the extinguishing of class B fires, the solution of which was obtained using the diffusion equation was solved.

Keywords: fire, extinguishing, mathematical descriptions, reaction rate.