

*Е.А. Тищенко, к.т.н., доцент, ЧИПБ им. Героев Чернобыля НУГЗУ,
Ю.А. Абрамов, д.т.н., профессор, НУГЗУ*

ПОГРЕШНОСТЬ ВРЕМЕНИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА КЛАССА В РАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ОШИБКОЙ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПРИ ЕЕ ПОДАЧЕ

Получены оценки для погрешности времени тушения пожара класса В при его тушении распыленной водой, которая обусловлена ошибкой воспроизведения при ее подаче.

Ключевые слова: время тушения, ошибка воспроизведения, динамические характеристики процесса тушения.

Постановка проблемы. Использование распыленной воды для тушения пожаров класса В является одним из эффективных методов пожаротушения. Дальнейшее совершенствование этого метода обуславливает изучение более тонких особенностей, что обуславливает необходимость в создании более строгих математических моделей, описывающих такой процесс тушения. Одной из проблем при этом является учет динамических свойств процесса тушения пожара класса В распыленной водой.

Анализ последних исследований и публикаций. Динамические свойства процесса тушения пожара класса В распыленной водой могут описываться дифференциальным уравнением Фурье [1], передаточными функциями [2] и векторно-матричными уравнениями [3]. Такой набор математических моделей открывает новые возможности при анализе и синтезе систем пожаротушения. В частности, использование передаточных функций процессов тушения пожара класса В с помощью распыленной воды позволяет аналитическим путем определять время тушения пожара [2], получать оценки, учитывающие инерционные свойства управляющих устройств систем пожаротушения [4] и др. Однако за пределами исследований осталась, например, оценка влияния динамических свойств процесса тушения пожара на точность воспроизведения подачи распыленной воды в очаг горения.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является определение погрешности времени тушения пожара класса В распыленной водой, которая обусловлена ошибкой воспроизведения при ее подаче.

Процесс тушения пожара класса В распыленной водой описывается передаточной функцией [4]

$$W(p) = \frac{\theta(p)}{I(p)} = \frac{raK}{\lambda V(T_k - T_0)} [0,5 + (p + 0,25)^{0,5}]^{-1}, \quad (1)$$

где r – теплота испарения воды; a , V , λ – коэффициент температуропроводности, линейная скорость выгорания и теплопроводность горючей жид-

кости соответственно; K – коэффициент использования воды; T_k, T_0 – температура кипения горючей жидкости и температура окружающей среды соответственно; $I(p)$ – изображение по Лапласу от интенсивности подачи распыленной воды $I(\tau)$; $\theta(p)$ – изображение по Лапласу от выражения

$$\theta(\tau) = [T_k - T(\tau)][T_k - T_0]^{-1}; \quad (2)$$

$T(\tau)$ – температура поверхности горячей жидкости; τ – безразмерное время, определяемое выражением

$$\tau = V^2 a^{-1} t. \quad (3)$$

Инерционность процесса тушения горячей жидкостью распыленной водой будет обуславливать наличие ошибки $\Delta(\tau)$ воспроизведения при ее подаче. На рис. 1 приведена схема, поясняющая появления такой ошибки.

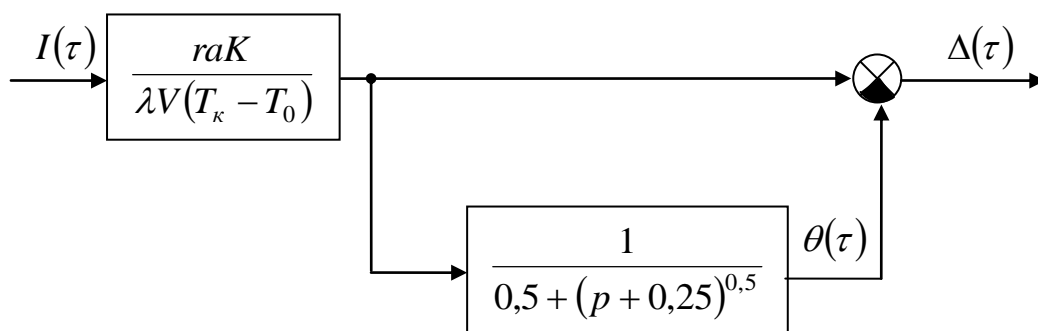


Рис. 1. Схема образования ошибки воспроизведения подачи распыленной воды

Ошибка воспроизведения в соответствии с рис. 1 определяется выражением

$$\Delta(\tau) = \frac{raK}{\lambda V(T_k - T_0)} L^{-1} \left[\left[1 - [0,5 + (p + 0,25)^{0,5}]^{-1} \right] I(p) \right], \quad (4)$$

где L^{-1} – оператор обратного интегрального преобразования Лапласа.

В (4) сомножитель при $I(p)$ представляет собой передаточную функцию ошибки, т.е.

$$\begin{aligned} W_{\Delta}(p) &= 1 - [0,5 + (p + 0,25)^{0,5}]^{-1} = \\ &= [(p + 0,25)^{0,5} - 0,5] [(p + 0,25)^{0,5} + 0,5]^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда для среднеквадратической ошибки воспроизведения при подаче распыленной воды можно записать [5]

$$\sigma = \frac{raK}{\lambda V(T_k - T_0)} \left[\int_0^{\infty} |W_{\Delta}(j\omega)|^2 S(\omega) d\omega \right]^{0,5}, \quad (6)$$

где $S(\omega)$ – спектральная плотность интенсивности подачи распыленной воды; $\omega = V^{-2}a\Omega$ – безразмерная круговая частота; Ω – размерная круговая частота; j – мнимая единица.

Вследствие того, что интенсивность подачи распыленной воды описывается прямоугольным импульсом, амплитуда которого I_0 , а длительность t_0 [2], то выражение для $S(\omega)$ имеет вид [6]

$$S(\omega) = I_0 \tau_0 \left| \frac{\sin \frac{\omega \tau_0}{2}}{\frac{\omega \tau_0}{2}} \right|, \quad (7)$$

где $\tau_0 = V^2 a^{-1} t_0$.

Для определения частотной характеристики $W_\Delta(j\omega)$, которая описывается выражением

$$W_\Delta(j\omega) = W_\Delta(p)|_{p=j\omega} = [(j\omega + 0,25)^{0,5} - 0,5][j\omega + 0,25]^{-1}, \quad (8)$$

воспользуемся заменой

$$(j\omega + 0,25)^{0,5} = \alpha(\omega) + j\beta(\omega), \quad (9)$$

где $\alpha(\omega)$, $\beta(\omega)$ – действительная и мнимая части комплексного числа, подлежащие определению.

Возводя в квадрат левую и правую части тождества (9), получим систему уравнений относительно искомым функций $\alpha(\omega)$ и $\beta(\omega)$, т.е.

$$\begin{aligned} \alpha^2(\omega) - \beta^2(\omega) &= 0,25; \\ 2\alpha(\omega)\beta(\omega) &= \omega. \end{aligned} \quad (10)$$

Решениями системы (10) являются

$$\alpha(\omega) = 0,5 \left[0,5 \left[(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 1 \right] \right]^{0,5}; \quad (11)$$

$$\beta(\omega) = 0,5 \left[0,5 \left[(1 + 16\omega^2)^{0,5} - 1 \right] \right]^{0,5}, \quad (12)$$

что после подстановки в (8) трансформирует его к следующему виду

$$W_\Delta(j\omega) = M(\omega) + jN(\omega), \quad (13)$$

где

$$M(\omega) = [\alpha^2(\omega) + \beta^2(\omega) - 0,25] \left[[\alpha(\omega) + 0,5]^2 + \beta^2(\omega) \right]^{-1}; \quad (14)$$

$$N(\omega) = \beta(\omega) \left[[\alpha(\omega) + 0,5]^2 + \beta^2(\omega) \right]^{-1}. \quad (15)$$

Тогда выражение для амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) $|W_{\Delta}(j\omega)|$ с учетом (13)÷(15) будет иметь вид

$$\begin{aligned} |W_{\Delta}(j\omega)| &= [M^2(\omega) + N^2(\omega)]^{0,5} = \\ &= \left[[\alpha^2(\omega) + \beta^2(\omega) - 0,25]^2 + \beta^2(\omega) \right]^{0,5} \left[[\alpha(\omega) + 0,5]^2 + \beta^2(\omega) \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (16)$$

Если учесть (11) и (12), то выражение (16) трансформируется следующим образом

$$|W_{\Delta}(j\omega)| = 4\omega \left[1 + (1 + 16\omega^2)^{0,5} + 2(0,5(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 0,5) \right]^{-1}. \quad (17)$$

На рис. 2 приведены графические зависимости от частоты для $|W_{\Delta}(j\omega)|^2$ – кривая 1; $(I\tau_0)^{-1}S(\omega)$ – кривая 2; $(I\tau_0)^{-1}|W_{\Delta}(j\omega)|^2S(\omega)$ – кривая 3 и $A_*(\omega)$ – кривая 4. Зависимость $A_*(\omega)$ представляет собой приведенную АЧХ пожара класса В при его тушении распыленной водой, которая описывается выражением

$$\begin{aligned} A_*(\omega) &= |W(j\omega)| = \left| \left[0,5 + (p + 0,25)^{0,5} \right]^{-1} \right|_{p=j\omega} = \\ &= 2 \left[1 + (1 + 16\omega^2)^{0,5} + \left(2(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 2 \right)^{0,5} \right]^{-0,5} \end{aligned} \quad (18)$$

При построении этих зависимостей принято, что $V = 5 \cdot 10^{-5} \text{ мс}^{-1}$, $a = 10^{-7} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$, $t_0 = 60 \text{ с}$.

Максимальное значение погрешности по температуре Δ_T , обусловленное погрешностью воспроизведения подачи распыленной воды в очаг горения, определяется выражением

$$\Delta_T = 3\sigma, \quad (19)$$

в котором при использовании (6) совместно с (7) и (17) необходимо бесконечный верхний предел заменить на конечную величину ω_0 . Тогда выражение (19) примет следующий вид

$$\sigma = \frac{3raK}{\lambda V(T_k - T_0)} \left[I\tau_0 \int_0^{\omega_0} |W_{\Delta}(\varphi\omega)|^2 \frac{|\sin 0,5\omega\tau_0|}{0,5\omega\tau_0} d\omega \right]^{0,5}. \quad (20)$$

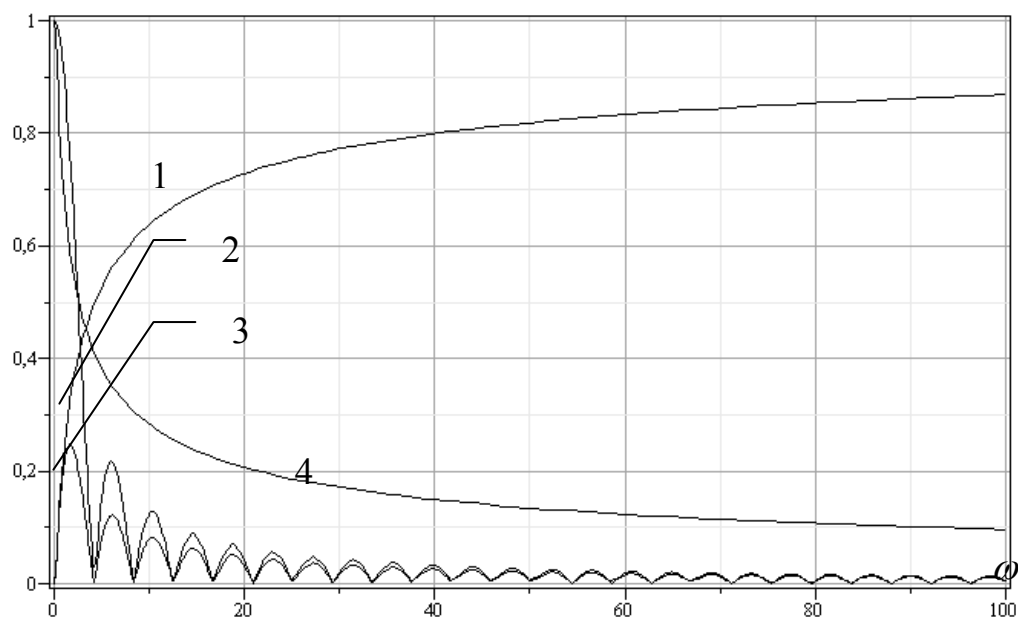


Рис. 2. Частотные зависимости: 1 – $|W_{\Delta}(j\omega)|^2$; 2 – $(I\tau_0)^{-1}S(\omega)$; 3 – $(I\tau_0)^{-1}|W_{\Delta}(j\omega)|^2 S(\omega)$; 4 – $A_*(\omega)$

Значение эффективной полосы пропускания ω_0 определяется из уравнения

$$A_*(\omega_0) - 0,1 = 0, \quad (21)$$

корнем которого, как это следует из рис. 2, является величина, равная 100.

Применительно для дизельного топлива имеет место: $\lambda = 0,1 \text{ Вт} \cdot (\text{м} \cdot \text{К})^{-1}$; $T_{\kappa} = 500 \text{ К}$; $I = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{с})^{-1}$; $\tau_0 = 1,5$. Значение интеграла в конечных пределах $\omega = [0, 100]$ равно 2,56, вследствие чего максимальное значение погрешности Δ_T для случая тушения дизельного топлива распыленной водой с коэффициентом использования $K = 0,01$ равно 1,62 К, что соответствует относительной погрешности 0,46%.

Время тушения τ_T пожара класса В распыленной водой определяется из (2) при $T = T_T$, где T_T – температура тушения горючей жидкости, т.е.

$$T_{\kappa} - T_T - (T_{\kappa} - T_0)\theta(\tau_T) = 0, \quad (22)$$

а зависимость $\theta(\tau)$ имеет вид [4]

$$\theta(\tau) = \frac{raK}{\lambda V(T_{\kappa} - T_0)} \left[1 + \left(\frac{\tau}{\pi} \right)^{0,5} \exp(-0,25\tau) - (1 + 0,5\tau) \operatorname{erfc}(0,5\tau^{0,5}) \right]. \quad (23)$$

Для дизельного топлива $T_T = 350\text{ K}$ и при условиях, соответствующих $K = 0,01$, это время равно 1,163 или в размерных единицах $t_T = 46,5\text{ с}$.

Образование погрешности определения времени тушения Δ_τ пожара класса В распыленной водой иллюстрируется рис. 3, из которого следует, что эта погрешность определяется выражением

$$\Delta_\tau = \tau_T - \tau_{T1} = \Delta_T \operatorname{tg} \alpha = \Delta_T \left(\left. \frac{dT(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau_T} \right)^{-1}. \quad (24)$$

Для случая тушения дизельного топлива, объединяя (2) и (23), получим, что $\left. \frac{dT(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau_T} = 33,4\text{ K}$. Тогда из (24) следует, что $\Delta_\tau \cong 0,05$, т.е. время тушения τ_{T1} будет равно 1,113 или в размерных единицах 44,5 с. Величина относительной погрешности определения времени тушения, обусловленной погрешностью воспроизведения подачи распыленной воды, равна 4,5%.

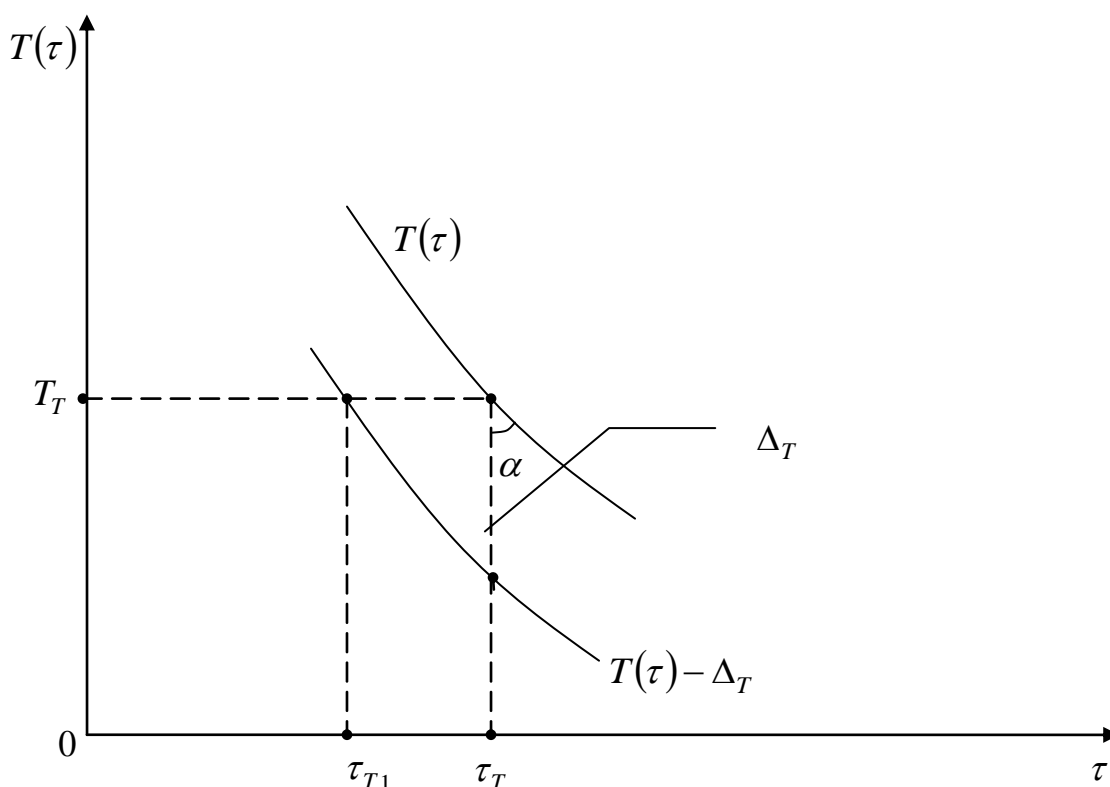


Рис. 3. К образованию погрешности определения времени тушения

Следует отметить, что время тушения такого очага горения для рассматриваемых условий, определенное экспериментальным путем, равно 49,7 с.

Выводы. Вследствие инерционных свойств процесса тушения пожара класса В распыленной водой имеет место динамическая ошибка воспроизведения при ее подаче. Применительно к тушению горящего дизельного топлива для условий, когда величина коэффициента использования воды составляет порядка 10^{-2} , величина погрешности такого типа составляет около 0,5%. Наличие такой ошибки обуславливает ошибку в определении времени тушения пожара, в основе которого лежит использование трансцендентного уравнения. Для рассматриваемого случая величина погрешности, обусловленной ошибкой воспроизведения при подаче распыленной воды, составляет 4,5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А. Методы определения времени тушения пожаров класса В распыленной водой / Ю.А. Абрамов, В.М. Гвоздь, Е.А. Тищенко // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ, 2013. – Вып. 34. – С. 3-8.
2. Абрамов Ю.А. Моделирование пожаров, их обнаружения, локализации и тушения / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов, А.А. Тарасенко. – Х.: НУГЗУ, 2011. – 928 с.
3. Абрамов Ю.А. Математические модели пожара класса В при его тушении распыленной водой / Ю.А. Абрамов, В.М. Гвоздь // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – Гомель: ГИИ МЧС республики Беларусь, 2013. – Т.8. – № 1. – С. 15-19.
4. Абрамов Ю.А. Моделирование процессов тушения пожаров класса В распыленной водой / Ю.А. Абрамов, Е.А. Тищенко // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ, 2015. – Вып. 37. – С. 3-8.
5. Востриков А.С. Теория автоматического регулирования / А.С. Востриков. – Новосибирск: НГУ, 2003. – 363 с.
6. Орнатский П.П. Автоматическое измерение и приборы / П.П. Орнатский. – К.: Вища школа, 1973. – 552 с.

Є.О. Тищенко, Ю.О. Абрамов

Похибка часу гасіння пожежі класу В розпиленою водою, яка обумовлена похибкою відтворення при її подачі

Отримано оцінки для похибки часу гасіння пожежі класу В при її гасінні розпиленою водою, яка обумовлена похибкою відтворення при її подачі.

Ключові слова: час гасіння, похибка відтворення, динамічні характеристики процесу гасіння.

E.A. Tischenko, Y.A. Abramov

Accuracy time of extinguishing the class B fire by water spray caused by reproduction error

Estimates of the error of extinguishing time of the class B fire by water spray, caused by reproduction error.

Keywords: extinguishing time, reproduction error, dynamic characteristics of an extinguishing process.