

УДК 614.8

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

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЖАРА КЛАССА В ПРИ ТУШЕНИИ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ

Для пожара класса В при его тушении распыленной водой получены более простые выражения для динамических характеристик во временной и в частотной областях.

Ключевые слова: пожар класса В, динамические характеристики, передаточная функция.

Постановка проблемы. Одним из направлений, обеспечивающих повышение эффективности тушения пожаров класса В, является использование распыленной воды. При этом, к числу проблем, подлежащих разрешению, следует отнести создание математических моделей, описывающих динамические свойства таких пожаров, особенностью которых является их универсальность.

Анализ последних исследований и публикаций. Универсальной динамической характеристикой пожара класса В при его тушении распыленной водой является его передаточная функция [1], выражение для которой получено в [2]. Особенностью такой математической модели является то, что она представляет собой иррациональную функцию комплексного аргумента. Наличие математической модели пожара в виде его передаточной функции позволяет определить его динамические характеристики как в частотной, так и во временной областях. Такие попытки были сделаны в [3], где приведены выражения для частотных характеристик пожара класса В, и в [4], где приведены выражения для переходных функций такого пожара при тушении распыленной водой. Использование динамических характеристик пожара класса В в таком виде в ряде случаев вызывает трудности. В этой связи возникает необходимость в дальнейшем совершенствовании математического описания процессов, имеющих место при тушении пожаров класса В распыленной водой.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является определение динамических характеристик пожара класса В при его тушении распыленной водой в частотной и временной областях.

В [2] получено выражение для передаточной функции пожара класса В при его тушении распыленной водой, которое имеет вид

$$W(p) = \frac{raK}{V\lambda(T_k - T_0)} q(p), \quad (1)$$

где $q(p) = [0,5 + (p + 0,25)^{0,5}]^{-1}$; r – теплота испарения; a – коэффициент

температуропроводности; K – коэффициент расхода воды; V – скорость горения жидкости; λ – теплопроводность жидкости; T_k – температура кипения жидкости; T_0 – температура окружающей среды; p – комплексное число.

Для приведенной амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) пожар класса В будет иметь место

$$q(j\omega) = q(p)|_{p=j\omega} = [0,5 + (0,25 + j\omega)^{0,5}]^{-1}, \quad (2)$$

где $\omega = V^{-2}a\Omega$; Ω – круговая частота; j – мнимая единица.

Если ввести обозначение

$$(0,25 + j\omega)^{0,5} = \alpha(\omega) + j\beta(\omega), \quad (3)$$

то для вещественной и мнимой частей функции (2) можно записать

$$\operatorname{Re} q(\omega) = \left[[0,5 + \alpha(\omega)]^2 + \beta^2(\omega) \right]^{-1} [0,5 + \alpha(\omega)]; \quad (4)$$

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

Неизвестные функции $\alpha(\omega)$ и $\beta(\omega)$ определяются решениями системы уравнений

$$\begin{aligned} \alpha^2(\omega) - \beta^2(\omega) &= 0,25; \\ 2\alpha(\omega)\beta(\omega) &= \omega, \end{aligned} \quad (6)$$

которая вытекает из (3).

Таковыми решениями являются

$$\alpha(\omega) = 0,5 \left[0,5 \left[(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 1 \right] \right]^{0,5}. \quad (7)$$

$$\beta(\omega) = 0,5 \left[0,5 \left[(1 + 16\omega^2)^{0,5} - 1 \right] \right]^{0,5}. \quad (8)$$

С учетом (3), (7) и (8) выражение для приведенной АФЧХ пожара класса В вида (2) трансформируется следующим образом

$$\begin{aligned} q(j\omega) &= \left[1 + \left[2(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 2 \right]^{0,5} + (1 + 16\omega^2)^{0,5} \right]^{-1} \times \\ &\times \left[2 + \left[2(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 2 \right]^{0,5} - j \left[2(1 + 16\omega^2)^{0,5} - 2 \right]^{0,5} \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

На рис. 1 приведен график зависимости $q(j\omega)$, построенный в соответствии с (9) на комплексной плоскости при $0 < \omega < \infty$.

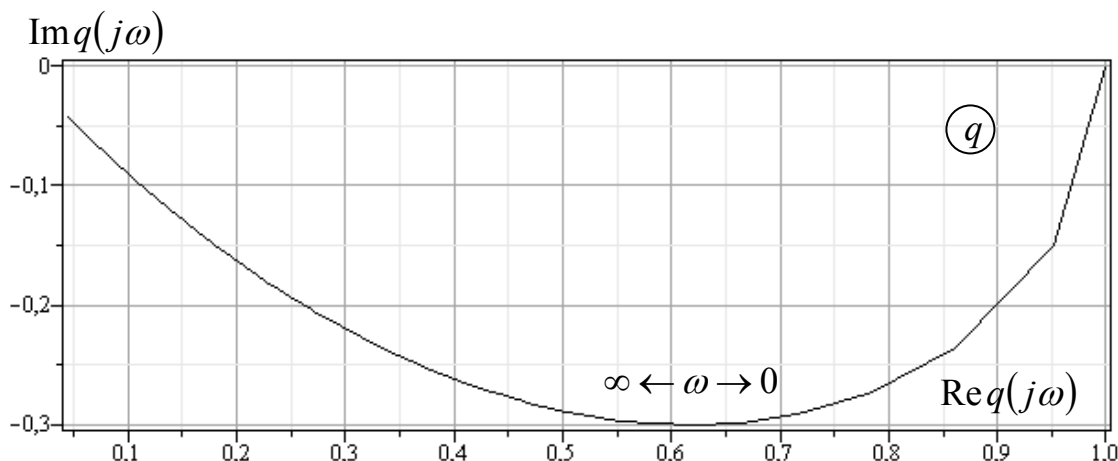


Рис. 1. Приведенная АФЧХ пожара класса В

Из (9) следуют выражения для приведенной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) $a(\omega)$ и приведенной фазово-частотной характеристики (ФЧХ) $f(\omega)$ пожара класса В

$$a(\omega) = \text{mod } q(j\omega) = 2 \left[1 + \left[2(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 2 \right]^{0,5} + (1 + 16\omega^2)^{0,5} \right]^{-0,5}; \quad (10)$$

$$f(\omega) = \arg q(j\omega) = \arctan \left[\frac{\left[2(1 + 16\omega^2)^{0,5} - 2 \right]^{0,5} \left[2 + \left[2(1 + 16\omega^2)^{0,5} + 2 \right]^{0,5} \right]^{-1}}{1} \right]. \quad (11)$$

На рис. 2 представлена графическая зависимость для приведенной логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ), которая связана с приведенной АЧХ соотношением

$$l(\omega) = 20 \lg a(\omega). \quad (12)$$

Из графической зависимости следует, что ЛАЧХ пожара класса В имеет наклон -10 Дб/дек и частоту сопряжения $\omega_c \cong 0,65$ (прямая линия на рис. 2 на участке $\omega \geq 0,65$ является асимптотой зависимости $l(\omega)$).

Вследствие того, что приведенная ЛАЧХ пожара класса В имеет наклон, равный -10 Дб/дек и который отличается от наклона ЛАЧХ апериодического звена с такой же частотой сопряжения в два раза, можно записать выражение для приведенной ЛАЧХ объекта управления следующим образом

$$l_1(\omega) \cong \frac{1}{2} 20 \lg a_9(\omega), \quad (13)$$

где $a_3(\omega)$ – приведенная АЧХ аperiodического звена с постоянной времени $\tau_3 = \omega_c^{-1} = 1,54$.

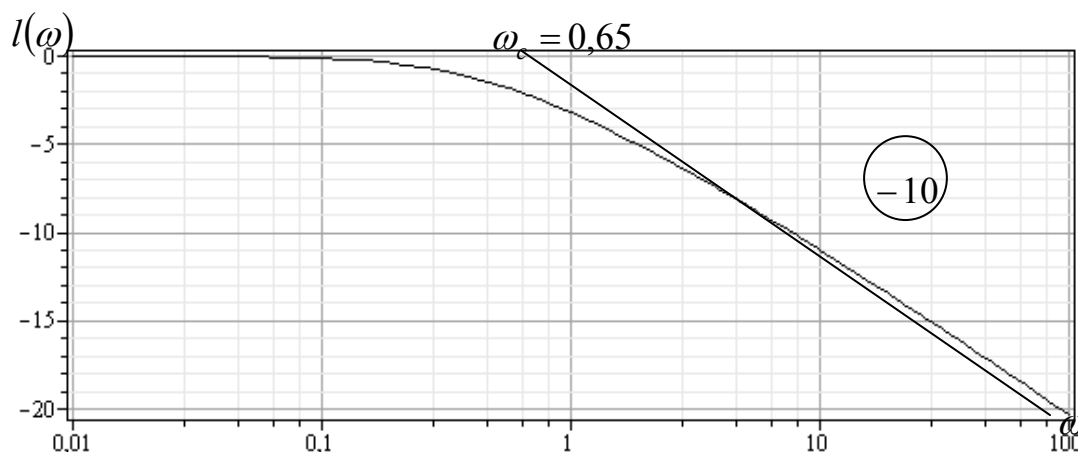


Рис. 2. Приведенная ЛАЧХ пожара класса В

Из (13) следует, что

$$l_1(\omega) \cong 20 \lg [a_3(\omega)]^{0,5}. \quad (14)$$

Сравнивая (12) и (14), получим

$$a(\omega) \cong [a_3(\omega)]^{0,5} = [1 + (\omega\tau_3)^2]^{-0,25} = a_1(\omega). \quad (15)$$

Таким образом, приведенная АЧХ пожара класса В как объекта управления системы пожаротушения может быть описана выражением (15), которое гораздо проще, чем (10). На рис. 3 приведены графики для частотных характеристик $a(\omega)$ – кривая 1 и $a_1(\omega)$ – кривая 2.

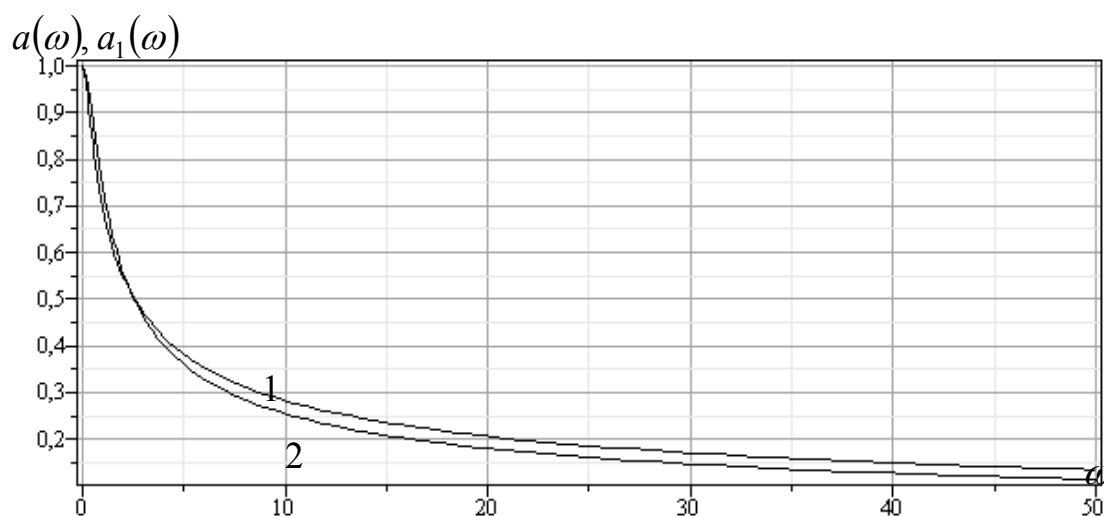


Рис. 3. Приведенные АЧХ пожара класса В: 1 – $a(\omega)$; 2 – $a_1(\omega)$

Зависимость абсолютной погрешности рассогласования от частоты между этими частотными характеристиками приведена на рис. 4.

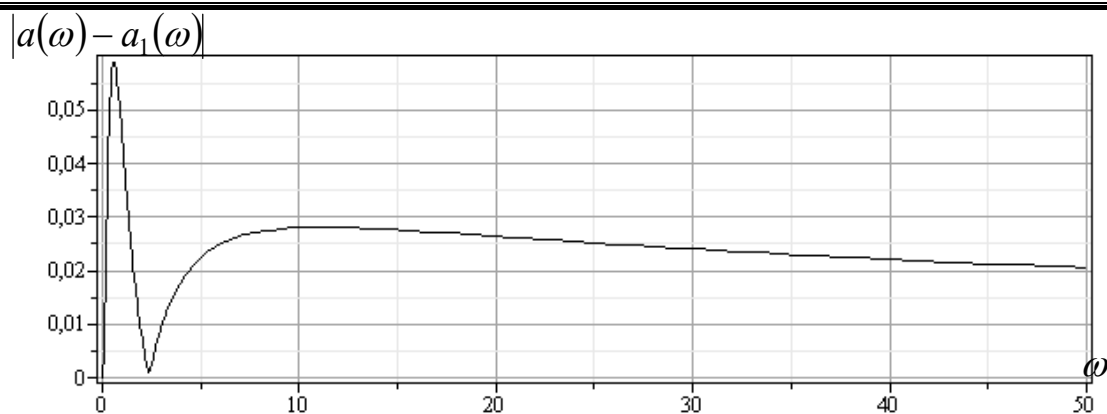


Рис. 4. Абсолютная погрешность рассогласования частотных характеристик

Как это следует из рис. 4, величина погрешности рассогласования не превышает 6,0 %.

Для минимально-фазовых устойчивых объектов между АЧХ и ФЧХ существует однозначная зависимость, которая определяется свойствами интегрального преобразования Гильберта.

Определим выражение для $f_1(\omega)$ через $a_1(\omega)$, которые связаны зависимостью [1]

$$q_1(j\omega) = a_1(\omega) \exp[jf_1(\omega)], \tag{16}$$

применение оператора логарифмирования к которой, трансформирует ее к виду

$$b(j\omega) = \ln q_1(j\omega) = \ln a_1(\omega) + jf_1(\omega). \tag{17}$$

В соответствии со свойствами интегрального преобразования Гильберта [5] будет иметь место

$$f_1(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln a_1(\mu)}{\mu - \omega} d\mu. \tag{18}$$

С учетом (15) выражение трансформируется следующим образом [6]

$$\begin{aligned} f_1(\omega) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln[1 + (\mu\tau_3)^2]^{-0,25}}{\mu - \omega} d\mu = -\frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln[1 + (\mu\tau_3)^2]}{\mu - \omega} d\mu = \\ &= -0,5 \arctan \omega\tau_3. \end{aligned} \tag{19}$$

Покажем, что пожару класса В при его тушении распыленной водой, который имеет АЧХ вида (15) и ФЧХ вида (19), будет соответствовать приведенная передаточная функция, определяемая выражением

$$q_1(p) = (\tau_3 p + 1)^{-0,5}. \tag{20}$$

Выражение для приведенной АФХ пожара класса В в соответствии с (20) имеет вид

$$q_1(j\omega) = q_1(p)|_{p=j\omega} = (1 + j\omega\tau_9)^{-0,5}. \quad (21)$$

Принимая во внимание соотношение [7]

$$(1 + j\omega\tau_9)^{0,5} = [1 + (\omega\tau_9)^2]^{0,25} \left(\cos \frac{u}{2} + j \sin \frac{u}{2} \right), \quad (22)$$

где $u = \arctan \omega\tau_9$, выражение (21) можно записать в следующем виде

$$\begin{aligned} q_1(j\omega) &= (1 + j\omega\tau_9)^{-0,5} = [1 + (\omega\tau_9)^2]^{-0,25} \left(\cos \frac{u}{2} + j \sin \frac{u}{2} \right)^{-1} = \\ &= [1 + (\omega\tau_9)^2]^{-0,25} \left(\cos \frac{u}{2} - j \sin \frac{u}{2} \right) = \\ &= [1 + (\omega\tau_9)^2]^{-0,25} (\cos v + j \sin v) = a_1(\omega) \exp[jf_1(\omega)], \end{aligned} \quad (23)$$

где учтено обозначение $v = -\frac{u}{2} = -0,5 \arctan \omega\tau_9$.

Таким образом, динамическому объекту, т.е. пожару класса В с приведенными АЧХ $a_1(\omega) = [1 + (\omega\tau_9)^2]^{-0,25}$ и ФЧХ $f_1(\omega) = -0,5 \arctan \omega\tau_9$, где $\tau_9 \cong 1,54$, будет соответствовать приведенная передаточная функция (20).

Следует заметить, что $\max|f_1(\omega)| = 0,785$, что соответствует углу сдвига фаз между интенсивностью подачи распыленной воды в очаг горения и температурой поверхности горящей жидкости, равному $38^\circ 10'$. Для $\max|f(\omega)| = 0,75$ величина этого угла равна $36^\circ 50'$, т.е. погрешность рассогласования между частотными характеристиками $f(\omega)$ и $f_1(\omega)$ не превышает 4,7 %.

Для получения динамической характеристики пожара класса В во временной области необходимо применить оператор обратного преобразования Лапласа L^{-1} к выражению $q_1(p)p^{-1}$, т.е.

$$h_1(\tau) = L^{-1} \left[(p(\tau_9 p + 1)^{0,5})^{-1} \right], \quad (24)$$

что приводит к выражению [7]

$$h_1(\tau) = A \operatorname{erf} \left[(\tau\tau_9^{-1})^{0,5} \right], \quad (25)$$

которое является приведенной переходной функцией пожара класса В

при его тушении распыленной водой.

В том случае, когда используется приведенная передаточная функция $q(p)$ (см. (1)) для определения по аналогии с (24) приведенной переходной функции $h(\tau)$, будет иметь место [7]

$$h(\tau) = L^{-1} \left[\left[p \left[0,5 + (p + 0,25)^{0,5} \right]^{-1} \right] \right] = 1 + \left(\frac{\tau}{\pi} \right)^{0,5} \exp(-0,25\tau) - (1 + 0,5\tau) \operatorname{erfc}(0,5\tau^{0,5}). \quad (26)$$

Из сравнения переходных функций (25) и (26) следует, что максимальное значение погрешности рассогласования (см. рис. 5) не превышает 4,4 %.



Рис. 5. Погрешность рассогласования между переходными функциями $h(\tau)$ и $h_1(\tau)$

Величина погрешности рассогласования $\Delta h(\tau) = h(\tau) - h_1(\tau)$ зависит от частоты сопряжения ω_c , т.е. $\Delta h = f(\omega_c)$. На рис. 6 приведена графическая зависимость этой погрешности от величины $\omega_c = 0,58 \div 0,66$.

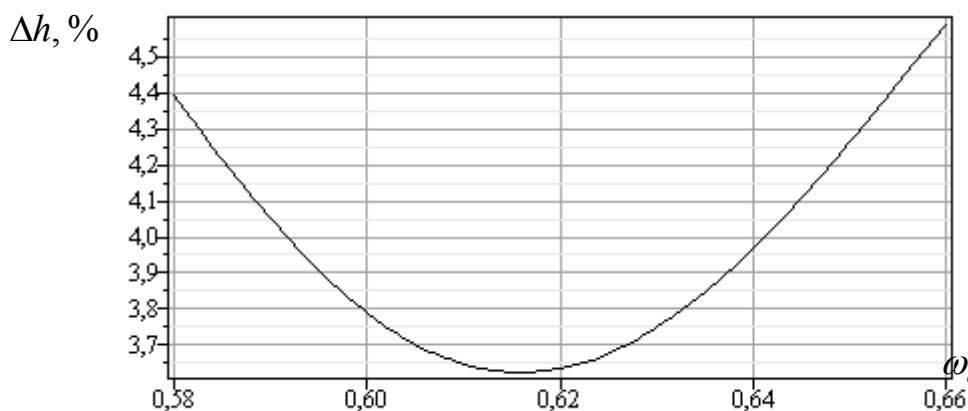


Рис. 6. Зависимость погрешности рассогласования от частоты сопряжения

Анализ этой зависимости свидетельствует о том, что ее минимум достигается при $\omega_c = 0,616$ и равен 3,6 %.

Выводы. Применительно к пожару класса В при его тушении распыленной водой получены выражения для динамических характеристик в частотной и во временной областях, которые отличаются от ранее полученных с погрешностью, величина которой не превышает единицу процентов, и имеют более простое математическое описание.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А. Основы пожарной автоматики / Ю.А. Абрамов. – Х.: ХВПТУ, 1993. – 288 с.
2. Абрамов Ю.А. Математические модели пожара класса В при его тушении распыленной водой [Электронный ресурс] / Ю.А. Абрамов, В.М. Гвоздь. – Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – Гомель: ГИИ МЧС респ. Беларусь, 2013. – Т. 8. – № 1. – С. 15-19.
3. Абрамов Ю.А. Частотные характеристики объекта управления системы тушения пожара класса В распыленной водой [Электронный ресурс] / Ю.А. Абрамов, Е.А. Тищенко // Проблемы пожарной безопасности. – Матеріали міжн. НПК. – Харків, НУЦЗУ, 2016. – С. 199-200.
4. Абрамов Ю.А. Моделирование процессов тушения пожаров класса В распыленной водой [Электронный ресурс] / Ю.А. Абрамов, Е.А. Тищенко // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ, 2015. – Вып. 37. – С. 3-8. – Режим доступа: http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol37/Ppb_2015_37_3.pdf.
5. Мышкис А.Д. Математика для вузов. Специальные курсы / А.Д. Мышкис. – М.: наука, 1971. – 632 с.
6. Градштейн И.С. Таблицы интегралов, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: Наука, 1971. – 1108 с.
7. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

Получено редколлегией 05.03.2017

Є.О. Тищенко, Ю.О. Абрамов

Динамічні характеристики пожежі класу В при гасінні розпиленою водою

Для пожежі класу В при її гасінні розпиленою водою отримано більш прості вирази для динамічних характеристик у часовій та частотній областях.

Ключові слова: пожежа класу В, динамічні характеристики, передаточна функція.

E. Tischenko, Y. Abramov

Dynamic characteristics of fire class B when it is being extinguished by water spray

Simpler expressions for dynamic characteristics in time and frequency areas are obtained for the fire class B which is being extinguished by water spray.

Keywords: fire of class B, dynamic characteristics, transmission function.