

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

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЖАРА КЛАССА В ПРИ ЕГО ТУШЕНИИ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ**

Рассмотрен метод определения частотных характеристик пожара класса В при его тушении распыленной водой, в основе которого лежит использование результатов измерения температуры поверхности горячей жидкости.

**Ключевые слова:** пожар класса В, распыленная вода, частотные характеристики.

**Постановка проблемы.** Одним из путей повышения эффективности тушения пожаров является использование новых, более совершенных методов проектирования систем пожаротушения. Такие методы ориентированы на использование соответствующего математического и алгоритмического обеспечения. Одной из проблем при этом является обеспечение достоверности результатов на этапе проектирования систем пожаротушения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В подавляющем большинстве процессы тушения пожаров класса В распыленной водой описываются эмпирическими зависимостями, которые справедливы для условий проведения экспериментов [1]. Известно использование для этих целей уравнения Фурье [2], однако его применение для решения задачи синтеза систем пожаротушения ограничено. В последнее время наметился подход для описания процессов, имеющих место при тушении пожаров класса В распыленной водой, который связан с использованием передаточных функций [3, 4]. Наличие передаточной функции объекта управления, которым является пожар, который подвергается активному воздействию огнетушащего вещества, позволяет распространить апробированные методы технической кибернетики для проектирования систем пожаротушения [4, 5]. Одним из таких методов является частотный метод, в основе которого лежит использование частотных характеристик объекта управления. Следует отметить, что в настоящее время отсутствует информация о методах определения частотных характеристик такого объекта управления экспериментальным путем.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является обоснование метода определения частотных характеристик объекта управления системы пожаротушения пожаров класса В распыленной водой экспериментальным путем.

Экспериментальное определение частотных характеристик осуществляется на установке, схема которой, приведена в [6] и которая допол-

нена датчиком температуры, располагаемом вблизи поверхности и внутри горячей жидкости. Датчик температуры имеет возможность перемещаться по мере выгорания жидкости.

С помощью датчика температуры измеряется температура  $T(t)$  в слое горячей жидкости, который расположен вблизи ее поверхности. Для определения частотных характеристик объекта управления системы пожаротушения используется безразмерная температура

$$\theta(\tau) = [T_{\text{к}} - T(t)] [T_{\text{к}} - T_0]^{-1}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{к}}$ ,  $T_0$  – температура кипения горючей жидкости и температура окружающей среды;  $\tau = V^2 a^{-1} t$  – безразмерное время;  $V$  – линейная скорость выгорания жидкости;  $a$  – коэффициент температуропроводности горючей жидкости.

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) объекта управления определяется выражением

$$W(j\omega) = \left[ \theta(p) I^{-1}(p) \right]_{p=j\omega}, \quad (2)$$

где  $\theta(p)$ ,  $I(p)$  – изображение по Лапласу от безразмерной температуры  $\theta(\tau)$  и интенсивности подачи распыленной воды  $I(\tau)$ ;  $\omega = V^{-2} a \Omega$  – безразмерная круговая частота;  $\Omega$  – размерная круговая частота.

Если  $I(\tau) = I_0 = \text{const}$ , что обеспечивается с помощью установки (см. [6]), то выражение (2) можно переписать следующим образом

$$W(j\omega) = I_0^{-1} p \theta(p) \Big|_{p=j\omega} = I_0^{-1} L \left[ \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} \right] \Big|_{p=j\omega} = I_0^{-1} \int_0^{\infty} \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (3)$$

где  $L$  – оператор интегрального преобразования Лапласа.

Результат измерений температуры поверхности горячей жидкости, преобразованный с помощью (1), в общем случае имеет вид, приведенный на рис. 1. Для определения АФЧХ объекта управления на этом графике в точках  $\tau_{i-1}$ ,  $i = 1, n$ , проводятся касательные к кривой  $\theta(\tau)$  [7]. Тогда можно записать, что

$$\left. \frac{d\theta(\tau)}{d\tau} \right|_i = \text{tg} \alpha_i = \text{const}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получим

$$W(j\omega) = \sum_{i=1}^n \text{tg} \alpha_i \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (5)$$

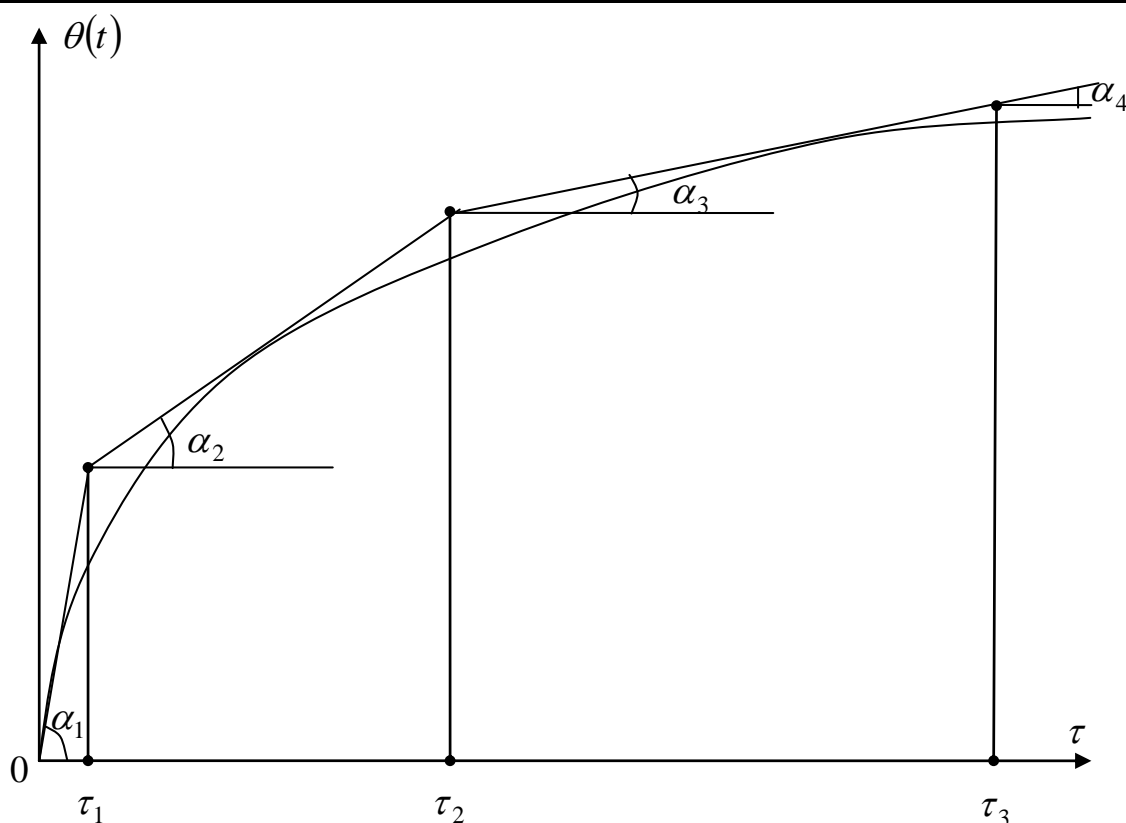


Рис. 1. К определению АФЧХ объекта управления

Если учесть связь между показательной и тригонометрической формулами записи комплексного числа, т.е.

$$e^{-j\omega\tau} = \cos \omega\tau - j \sin \omega\tau, \quad (6)$$

то выражение (5) будет иметь вид

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \omega^{-1} \sum_{i=1}^n \operatorname{tg} \alpha_i [(\sin \omega\tau_i - \sin \omega\tau_{i-1}) + j(\cos \omega\tau_i - \cos \omega\tau_{i-1})] = \\ &= P(\omega) + jQ(\omega), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $P(\omega)$ ,  $Q(\omega)$  – вещественная частотная характеристика (ВЧХ) и мнимая частная характеристика (МЧХ) объекта управления системы автоматического пожаротушения соответственно

Очевидно, что имеет место

$$P(\omega) = \omega^{-1} \sum_{i=1}^n \operatorname{tg} \alpha_i (\sin \omega\tau_i - \sin \omega\tau_{i-1}); \quad (8)$$

$$Q(\omega) = \omega^{-1} \sum_{i=1}^n \operatorname{tg} \alpha_i (\cos \omega\tau_i - \cos \omega\tau_{i-1}). \quad (9)$$

Тогда выражение для амплитудно-частотной характеристики

(АЧХ)  $A(\omega)$  и фазо-частотной характеристики (ФЧХ)  $\varphi(\omega)$  объекта управления будут определяться выражениями [8]

$$A(\omega) = [P^2(\omega) + Q^2(\omega)]^{0,5}; \quad (10)$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}[Q(\omega)P^{-1}(\omega)]. \quad (11)$$

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) определяется выражением

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega). \quad (12)$$

Следует заметить, что все выражения для частотных характеристик, полученные с помощью рассмотренного метода, представлены в безразмерной форме.

Выражения для частотных характеристик (7)-(12) получены при условии, что датчик температуры, с помощью которого осуществляется измерение температуры  $T(t)$ , является безынерционным. Если измерение температуры осуществляется с помощью датчика, инерционными свойствами которого пренебречь нельзя, то результатом реализации рассмотренного метода будет произведение АФЧХ объекта управления системы пожаротушения  $W(j\omega)$  и АФЧХ датчика температуры  $W_0(j\omega)$ , т.е.

$$\begin{aligned} W_1(j\omega) &= W(j\omega)W_0(j\omega) = P_1(\omega) + jQ_1(\omega) = \\ &= [P(\omega) + jQ(\omega)][M(\omega) + jN(\omega)], \end{aligned} \quad (13)$$

где  $M(\omega)$ ,  $N(\omega)$  – вещественная и мнимая частотные характеристики датчика температуры соответственно;  $P_1(\omega)$ ,  $Q_1(\omega)$  – вещественная и мнимая частотные характеристики объекта управления вместе с датчиком температуры соответственно.

Из (13) следует, что

$$P_1(\omega) = P(\omega)M(\omega) - Q(\omega)N(\omega); \quad (14)$$

$$Q_1(\omega) = P(\omega)N(\omega) + Q(\omega)M(\omega). \quad (15)$$

В системе (14)-(15) искомыми являются  $P(\omega)$  и  $Q(\omega)$ , предполагая, что частотные характеристики датчика температуры известны. Тогда из (14)-(15) следует

$$P(\omega) = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad Q(\omega) = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad (16)$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} M(\omega) & -N(\omega) \\ N(\omega) & M(\omega) \end{vmatrix}; \Delta_1 = \begin{vmatrix} P_1(\omega) & -N(\omega) \\ Q_1(\omega) & M(\omega) \end{vmatrix}; \Delta_2 = \begin{vmatrix} M(\omega) & P_1(\omega) \\ N(\omega) & Q_1(\omega) \end{vmatrix}. \quad (17)$$

Объединяя (16) и (17), получим решение алгебраического уравнения (15) относительно  $P(\omega)$  и  $Q(\omega)$  в виде

$$P(\omega) = \frac{P_1(\omega)M(\omega) + Q_1(\omega)N(\omega)}{M^2(\omega) + N^2(\omega)}; \quad (18)$$

$$Q(\omega) = \frac{Q_1(\omega)M(\omega) - P_1(\omega)N(\omega)}{M^2(\omega) + N^2(\omega)}. \quad (19)$$

Следует отметить, что знаменатель выражений (18) и (19) представляет собой квадрат АЧХ датчика температуры, т.е.

$$A_0^2(\omega) = M^2(\omega) + N^2(\omega). \quad (20)$$

В первом приближении динамические свойства датчика температуры можно описать моделью апериодического звена с параметрами  $K$  и  $\tau_0$ . Тогда можно записать [8]

$$M(\omega) = K(1 + \omega^2\tau_0^2)^{-1}; N(\omega) = -K\omega\tau_0(1 + \omega^2\tau_0^2)^{-1}, \quad (21)$$

что после подстановки в (18) и (19) трансформирует эти выражения к следующему виду

$$P(\omega) = K^{-1}[P_1(\omega) - \omega\tau_0 Q_1(\omega)]; \quad (22)$$

$$Q(\omega) = K^{-1}[Q_1(\omega) + \omega\tau_0 P_1(\omega)]. \quad (23)$$

Следует заметить, что при  $\tau_0 \rightarrow 0$ , т.е. в случае использования безынерционного датчика температуры, выражения для частотных характеристик  $P(\omega)$  и  $P_1(\omega)$ , а также  $Q(\omega)$  и  $Q_1(\omega)$  совпадают с точностью до значения параметра  $K$ .

**Выводы.** Применительно к пожарам класса В, тушение которых осуществляется с помощью распыленной воды, обоснован метод получения частотных характеристик, основанный на использовании результатов измерений температуры поверхности горячей жидкости. В основе метода лежит преобразование данных, принадлежащих временной области, в массив данных, принадлежащих частотной области. Для преобразования используется тригонометрическая форма представления комплексных чисел. Метод позволяет учесть инерционные свойства канала измерения температуры поверхности горячей жидкости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кухно А.Н., Панин Е.Н. Зависимость времени тушения от интенсивности подачи воды. Пожаротушение М: ВНИИПО, 1984. С. 84-93.
2. Абрамов Ю.А. Математическое описание процесса тушения пожара класса В распыленной водой / Ю.А. Абрамов, В.М. Гвоздь // Пожежна безпека: Теорія і практика. – Черкаси: ЧАПБ, 2012. – № 12. – С. 4-8.
3. Абрамов Ю.А. Моделирование пожаров, их обнаружения, локализации и тушения / Ю.А. Абрамов, А.Е. Басманов, А.А. Тарасенко. – Х.: НУГЗУ, 2011. – 927 с.
4. 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.
5. Губарев А.П. Управление в технических системах с газовым или жидким компонентом / А.П. Губарев, А.В. Узунов, Ю.А. Абрамов и др. – К.: ИСМО, 1997. – 288 с.
6. Садковой В.П. Экспериментальное определение параметров и характеристик объекта управления класса В системы автоматического пожаротушения распыленной водой / В.П. Садковой, Ю.А. Абрамов // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: УГЗУ, 2009. – Вып. 26. – С. 126-134.
- Цыпкин Я.З. Теория импульсных систем. – М : Физматгиз, 1963. – 282 с.
7. 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.
8. Абрамов Ю.А. Основы пожарной автоматики / Ю.А. Абрамов. – Х.: ХВПТУ, 1993. – 288 с.

*Получено редколлегией 09.10.2016*

Е.А. Тищенко, Ю.О. Абрамов

**Експериментальний метод визначення частотних характеристик пожежі класу В при її гасінні розпиленою водою**

Розглянутий метод визначення частотних характеристик пожежі класу В при її гасінні розпиленою водою, в основі якого лежить використання результатів вимірювання температури поверхні гидкості, що горить.

**Ключові слова:** пожежа класу В, розпилена вода, частотні характеристики.

E.A. Tischenko, Y.A. Abramov

**Experimental method of determination the frequency characteristics of the class b fire when extinguishing spraying water.**

Method of determination the frequency characteristics of the class B fire when extinguishing spraying water, which is based on using the results of surface temperature of burning liquid has been considered.

**Keywords:** Class B fire, spraying water, frequency characteristics.