

УДК 614.8

*Ю. А. Абрамов, д. т. н., проф.,
Национальный университет гражданской защиты Украины,
Е. А. Тищенко, к. т. н., доц.,
Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля
НУГЗ Украины*

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

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

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

где T_k, 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; Ω – размерная круговая частота.

Если $I(\tau) = I_0 = const$, 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

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

Подставляя (4) в (3), получим

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

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

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

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

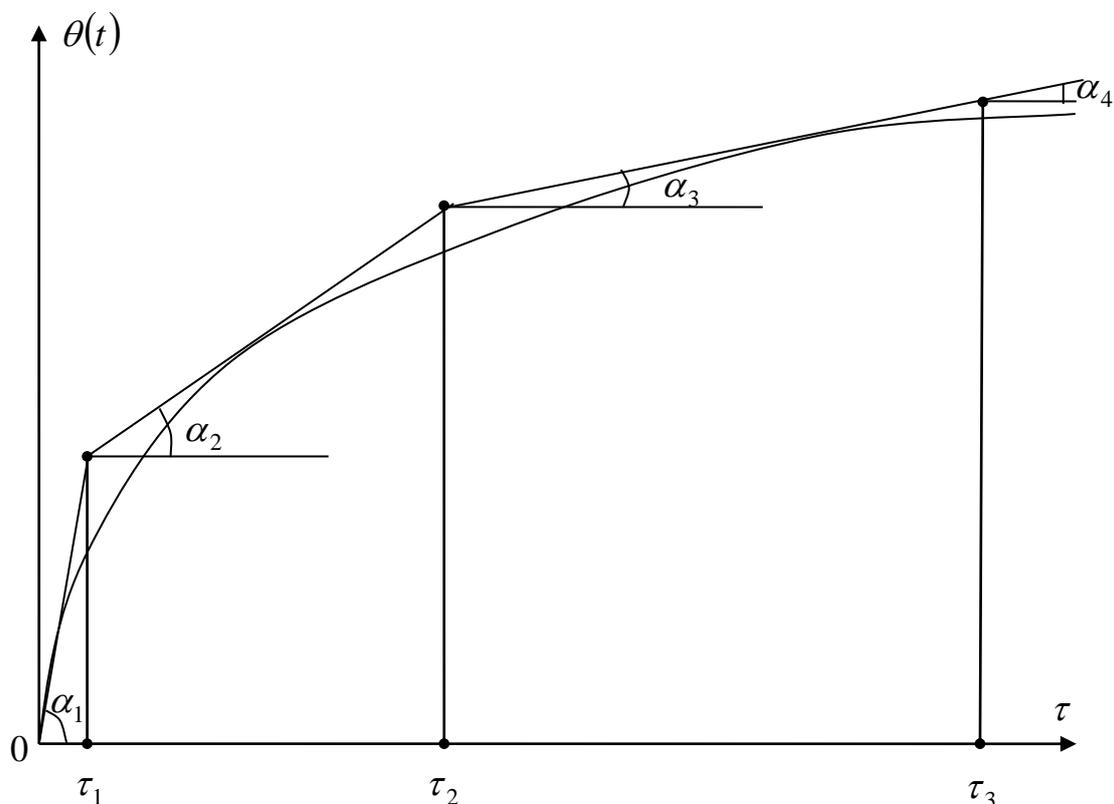


Рисунок 1 – К определению АФЧХ объекта управления

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 безинерционным. 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

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

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 аperiodического звена с параметрами K и τ_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 $\tau \rightarrow 0$, 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. Зависимость времени тушения от интенсивности подачи воды / А.Н. Кухно, Е.Н. Панин // 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.
7. Цыпкин Я.З. Теория импульсных систем. – М.: Физматгиз, 1963. – 282 с.
8. 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.
9. Абрамов Ю.А. Основы пожарной автоматики / Ю.А. Абрамов. – Х.: ХАПТУ, 1993. – 288 с.