

*Е.А. Рыбка, к.т.н., ст. научн. сотр., НУГЗУ,  
Э.Е. Прохач, д.т.н., профессор, зам. директора,  
ООО „Харьковский научный центр военной экологии”*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ МОДЕЛИ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ**

Определены и проанализированы динамические погрешности модели нагревательного устройства с системой управления термическим комплексом для испытаний образцов строительных конструкций на огнестойкость.

**Ключевые слова:** предел огнестойкости, термический комплекс, сигнал управления, преобразования Лапласа, динамическая погрешность.

**Постановка проблемы.** Перспективным направлением обеспечения огнестойкости различных элементов строительных конструкций является использование подхода, который предусматривает применение расчетных методик, в связи с тем, что они имеют меньшую стоимость, трудоемкость, и не требуют дорогостоящего громоздкого экспериментального оборудования.

Однако повышение эффективности таких исследований сопряжено с проблемой усовершенствования оборудования для испытания образцов строительных конструкций на огнестойкость, в частности малоразмерных нагревательных печей.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Современные малогабаритные испытательные печи [1-2], ориентированные на решение задач по обеспечению требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций, имеют простую систему управления нагревательным устройством, что препятствует корректной реализации необходимых законов изменения температуры в их рабочем пространстве.

В работе [3] представлена процедура формирования математического описания входного воздействия системы управления для воспроизведения произвольных температурных законов в рабочем объеме разработанного термического комплекса [4] для испытаний образцов строительных конструкций на огнестойкость и проанализирована погрешность рассогласования между теоретическими и экспериментальными данными. Представляет интерес исследования динамических погрешностей модели нагревательного устройства с системой управления термическим комплексом.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является определение динамической погрешности модели нагревательного устройства

с системой управления термическим комплексом, как подсистемы по определению пределов огнестойкости строительных конструкций, а также огнезащитных свойств покрытий для этих конструкций.

В общем виде динамические погрешности модели нагревательного устройства с системой управления термическим комплексом могут быть представлены следующим образом

$$\varepsilon_j(\tau) = \Delta_j(\tau) - t_j(\tau), \quad (1)$$

$$\delta_j(\tau) = \frac{\varepsilon_j(\tau)}{\Delta_j(\tau)}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_j(\tau)$  – абсолютная;  $\delta_j(\tau)$  – относительная динамическая погрешность;  $t_j(\tau)$  – температура в камере печи;  $\Delta_j(\tau)$  – входной сигнал системы управления

$$\Delta(\tau) = L^{-1} \left[ (T_T p + 1)^{-1} \left[ \prod_{i=1}^2 (T_i p + 1) \right] \sum_{j=0}^n \omega_j j! p^{-(j+1)} \right], \quad (3)$$

где  $L^{-1}$  – оператор обратного преобразования Лапласа;  $T_T$  и  $T_i$  – постоянные времени температурного датчика и термического комплекса соответственно;  $\omega$ ,  $j$  и  $i$  – параметры.

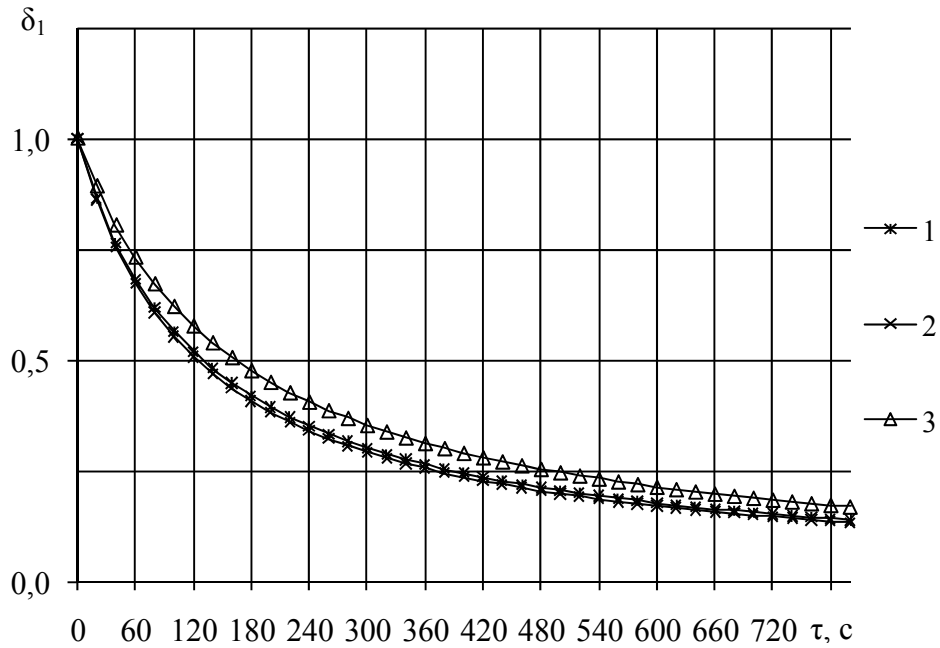
Рассмотрим примеры для зависимостей (1-2) при значениях параметра  $j = 1, 3$ .

Для случая, когда  $j = 1$ , динамические погрешности нагревательного устройства с системой управления термического комплекса описываются выражениями

$$\varepsilon_1(\tau) = \Delta_1(\tau) - t_1(\tau) = \omega_1 \left( T_1 + T_2 - T_T + \frac{T_1 T_2 - T_T (T_1 + T_2) + T_T^2}{T_T^2} e^{-\frac{\tau}{T_T}} \right), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \delta_1(\tau) = \frac{\varepsilon_1(\tau)}{\Delta_1(\tau)} &= \frac{\omega_1 \left( T_1 + T_2 - T_T + \frac{T_1 T_2 - T_T (T_1 + T_2) + T_T^2}{T_T^2} e^{-\frac{\tau}{T_T}} \right)}{\omega_1 \left( T_1 + T_2 - T_T + \tau + \frac{T_1 T_2 - T_T (T_1 + T_2) + T_T^2}{T_T^2} e^{-\frac{\tau}{T_T}} \right)} = \\ &= \frac{1}{1 + \frac{\tau}{T_1 + T_2 - T_T + \frac{T_1 T_2 - T_T (T_1 + T_2) + T_T^2}{T_T^2} e^{-\frac{\tau}{T_T}}}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Графическое изображение относительной динамической погрешности для первых точек различных уровней термического комплекса представлены на рис. 1.



**Рис. 1. Относительная динамическая погрешность при  $j = 1$  для первой точки соответственно 1-го, 2-го и 3-го уровней термического комплекса**

Следует отметить, что для определения момента времени, при котором значение относительной динамической погрешности равняется 0,5, необходимо воспользоваться трансцендентным уравнением

$$T_1 + T_2 - T_T - \tau + \frac{T_1 T_2 - T_T (T_1 + T_2) + T_T^2}{T_T^2} e^{-\frac{\tau}{T_T}} = 0. \quad (6)$$

Для точки 1 первого уровня термического комплекса значение относительной динамической погрешности 0,5 наступает на 130с.

Если  $j = 2$ , то абсолютная динамическая погрешность описывается следующим образом

$$\varepsilon_2(\tau) = \Delta_2(\tau) - t_2(\tau) = 2\omega_2 \left( \begin{array}{l} T_1 T_2 + (T_1 + T_2)(\tau - T_T) - T_T \tau + T_T^2 + \\ + ((T_1 + T_2)T_T - T_T^2 - T_1 T_2) e^{-\frac{\tau}{T_T}} \end{array} \right), \quad (7)$$

а относительная динамическая погрешность принимает вид

$$\delta_2(\tau) = \frac{2\omega_2 \left( T_1 T_2 + (T_1 + T_2)(\tau - T_T) - T_T \tau + T_T^2 + \left( (T_1 + T_2) T_T - T_T^2 - T_1 T_2 \right) e^{-\frac{\tau}{T_T}} \right)}{2\omega_2 \left( T_1 T_2 + (T_1 + T_2)(\tau - T_T) - T_T \tau + T_T^2 + 0,5\tau^2 + \left( (T_1 + T_2) T_T - T_T^2 - T_1 T_2 \right) e^{-\frac{\tau}{T_T}} \right)} = \quad (8)$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{0,5\tau^2}{T_1 T_2 + (T_1 + T_2)(\tau - T_T) - T_T \tau + T_T^2 + \left( (T_1 + T_2) T_T - T_T^2 - T_1 T_2 \right) e^{-\frac{\tau}{T_T}}}}$$

Графическое изображение относительной динамической погрешности термического комплекса представлены на рис. 2.

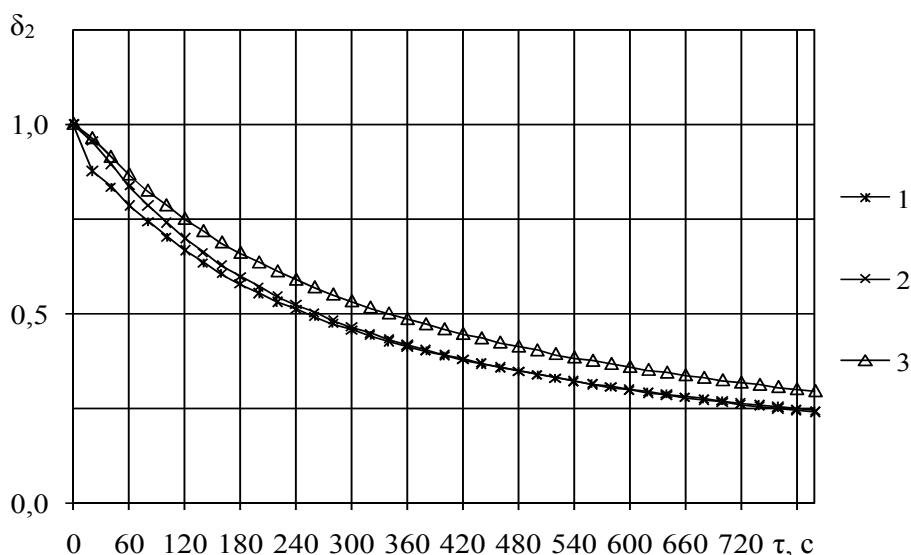


Рис. 2. Относительная динамическая погрешность при  $j = 2$  для первой точки соответственно 1-го, 2-го и 3-го уровней термического комплекса

Время, при котором значение абсолютной динамической погрешности достигает 0,5, определяется уравнением

$$T_1 T_2 + (T_1 + T_2)(\tau - T_T) - T_T \tau + T_T^2 + 0,5\tau^2 + \left( (T_1 + T_2) T_T - T_T^2 - T_1 T_2 \right) e^{-\frac{\tau}{T_T}} = 0, \quad (9)$$

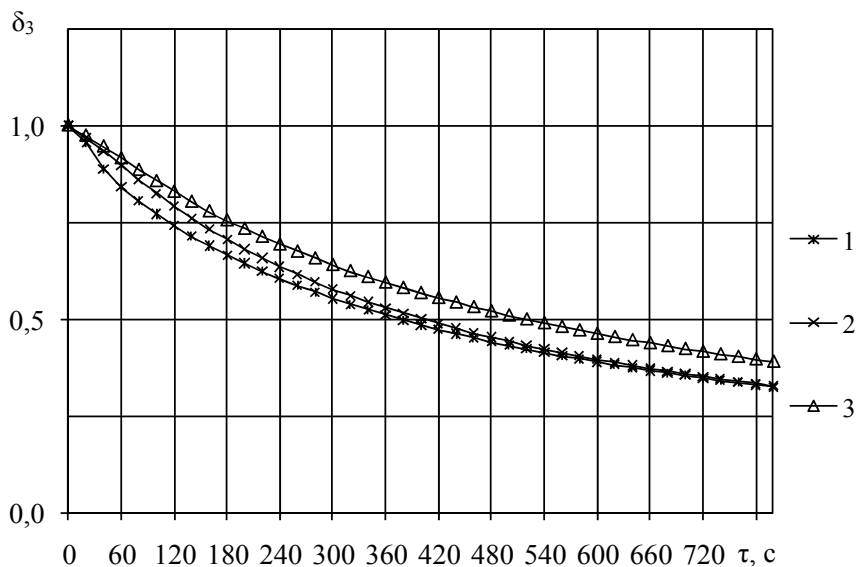
из которого следует, что  $\tau_{2,0,5} = 250 \text{ с}$ .

Для случая, когда  $j = 3$ , динамические погрешности математической модели нагревательного устройства с системой управления термического комплекса описываются выражениями

$$\varepsilon_3(\tau) = \Delta_3(\tau) - t_3(\tau) = 3\omega_3 \left( \begin{aligned} &(T_1 + T_2 - T_T)\tau^2 + 2T_1T_2(\tau - T_T) - 2T_T^3 + \\ &+ 2T_T^2(T_1 + T_2 + \tau) - 2T_T(T_1 + T_2)\tau + \\ &+ (6\omega_3T_1T_2 + 6\omega_3T_T^2 - 6\omega_3(T_1 + T_2)T_T) e^{-\frac{\tau}{T_T}} \end{aligned} \right), \quad (10)$$

$$\delta_3(\tau) = \frac{\varepsilon_3(\tau)}{\Delta_3(\tau)} = \frac{1}{1 + \frac{\frac{1}{3}\tau^3}{(T_1 + T_2 - T_T)\tau^2 + 2T_1T_2(\tau - T_T) - 2T_T^3 + 2T_T^2(T_1 + T_2 + \tau) - 2T_T(T_1 + T_2)\tau + (6\omega_3T_1T_2 + 6\omega_3T_T^2 - 6\omega_3(T_1 + T_2)T_T) e^{-\frac{\tau}{T_T}}}}. \quad (11)$$

Графическое изображение относительной динамической погрешности для первых точек различных уровней термического комплекса представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Относительная динамическая погрешность при  $j = 3$  для первой точки соответственно 1-го, 2-го и 3-го уровней термического комплекса

Время, при котором наступает значение 0,5 абсолютной динамической погрешности, определяется из решения трансцендентного уравнения

$$\begin{aligned} &(T_1 + T_2 - T_T)\tau^2 + 2T_1T_2(\tau - T_T) - 2T_T^3 + 2T_T^2(T_1 + T_2 + \tau) - \tau \frac{1}{3}\tau^3 - \\ &- 2T_T(T_1 + T_2) + (6\omega_3T_1T_2 + 6\omega_3T_T^2 - 6\omega_3(T_1 + T_2)T_T) e^{-\frac{\tau}{T_T}} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Для точки 1 первого уровня термического комплекса значение относительной динамической погрешности 0,5 наступает на 380с.

**Выводы.** Рассмотрены динамические погрешности модели нагревательного устройства с системой управления термическим комплексом, ориентированного на решение задачи обеспечения требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций, для температурных законов описанных полиномиальными зависимостями до третьего порядка включительно.

Определено время, при котором значение абсолютной динамической погрешности достигает 0,5 для  $j = 1 \div 3$ , которое составляет 130с, 250с и 380с соответственно.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Определение теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по металлу: Методика. – М.: ВНИИПО, 1998. – 19 с.

2. Поздеев А.В. Урахування впливу модифікаторів бетону залізобетонних балок при розрахунковому визначенні їх вогнестійкості: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 21.06.02 “Пожежна безпека” / А.В. Поздеев. – Київ, 2012. – 22с.

3. Рыбка Е.А. Синтез математического описания управляющего воздействия на нагревательные элементы термического комплекса для испытаний образцов строительных конструкций на огнестойкость / Е.А. Рыбка, В.М. Гвоздь // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. трудов. – 2014. – № 35. – С. 179-187.

4. Андронов В.А. Лабораторна установка для визначення вогнезахисних властивостей реактивних вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій / В.А. Андронов, Є.О. Рибка // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: УГЗУ, 2009. – Вып. 26. – С. 3-11.

Є.О. Рибка, Е.Ю. Прохач

**Визначення динамічних похибок моделі нагрівального пристрою з системою управління термічним комплексом для випробувань зразків будівельних конструкцій на вогнестійкість**

Визначено та проаналізовано динамічні похибки моделі нагрівального пристрою з системою управління термічним комплексом для випробувань зразків будівельних конструкцій на вогнестійкість.

**Ключові слова:** межа вогнестійкості, термічний комплекс, сигнал управління, перетворення Лапласа, динамічна похибка.

E. Rybka, E. Prokhach

**Determining the dynamic errors of the heating device model with the control system of thermal testing complex for building structures tests for fire resistance**

It is identified and analyzed the dynamic errors of the heating device model with the control system thermal testing complex for building structures tests for fire resistance.

**Keywords:** fire resistance, thermal complex, the control signal, Laplace transformation, dynamic error.