

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ РЕАГУВАННЯ НА НАДЗВИЧАЙНІ СИТУАЦІЇ

УДК 614.8:681.3

*Садковой В.П., канд. психол. наук, ректор,
Абрамов Ю.А., д-р техн. наук, гл. науч. сотр.*

Академия гражданской защиты Украины

ОЦЕНКА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ДАТЧИКОВ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ СО СФЕРИЧЕСКИМ ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Получены математические модели датчиков первичной информации систем автоматического пожаротушения, с помощью которых проведена оценка быстродействия таких датчиков.

Постановка проблемы. Системы автоматического пожаротушения (САП) получают все большее распространение, что обусловлено рядом их преимуществ по сравнению с традиционными методами тушения пожаров. В частности, одним из основных преимуществ САП является их высокая оперативность, что обуславливает минимизацию прямого ущерба от пожара. В [1, 2] приводятся данные о том, что среднеобъемная температура в помещении с пожарной нагрузкой, величина которой лежит в диапазоне $(25 \div 1500)$ МДж/м², за первые $(5 \div 15)$ мин. развития пожара может достигать порядка $(150 \div 700)$ К. В общем случае такое изменение температуры в начальной стадии пожара возможно обнаружить только с использованием датчиков первичной информации (ДПП) САП. При этом принципиальным является то, что САП одновременно с получением такой информации формирует команду на тушение пожара. Реализация такой команды в САП может осуществляться с использованием различных алгоритмов тушения пожара, в частности, и с помощью адаптивных. В этом случае обеспечивается снижение косвенных ущербов от пожаров.

Анализ последних исследований и публикаций. В [3] приводятся данные о том, что одним из основных опасных факторов пожара является температура и этот информационный параметр используется для построе-

ния примерно 40% ДПИ САП. Анализ [4] свидетельствует о том, что для построения таких ДПИ предпочтение следует отдать терморезистивным чувствительным элементам, использование которых позволяет расширить функциональные возможности таких датчиков. Следует заметить, что для построения САП, в которых реализован адаптивный принцип их функционирования, необходимо располагать быстродействующими ДПИ. В [5] получены модели терморезистивного чувствительного элемента ДПИ САП, который выполнен в виде сплошного цилиндра. Анализ показывает, что повышение быстродействия терморезистивных чувствительных элементов ДПИ возможно за счет использования других форм чувствительных элементов.

Постановка задачи и ее решение. Рассмотрим ДПИ САП с терморезистивным чувствительным элементом в виде сферы. Пусть R_1 и R_2 – внутренний и внешний радиусы сферы соответственно.

Получим оценки быстродействия ДПИ САП с терморезистивным чувствительным элементом, который выполнен в виде сферы.

ДПИ такого типа включает в свой состав чувствительный элемент (ЧЭ), датчик съема информации (ДСИ) и усилитель (У).

Тепловые процессы в терморезистивном ЧЭ описываются уравнением [6]

$$\frac{\partial \theta(r, t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta(r, t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \theta(r, t)}{\partial r} \right) \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$\theta(r, 0) = 0; \quad \frac{\partial \theta(R_1, t)}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial \theta(R_2, t)}{\partial r} = -h(\theta(R_2, t) - \theta_0), \quad (2)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала ЧЭ; h – относительный коэффициент конвективного теплообмена между ЧЭ и окружающей средой; $\theta_0 = T_c - T_0$; T_c, T_0 – температура на поверхности ЧЭ и температура окружающей среды соответственно; $\theta(r, t) = T(r, t) - T_0$; $T(r, t)$ – температура ЧЭ в произвольной точке.

Применим к уравнению (1) интегральное преобразование вида [7]

$$\bar{\theta}(\mu_n, t) = \int_{R_1}^{R_2} r^2 \theta(r, t) \Psi_n(r, \mu_n) dr, \quad (3)$$

где

$$\Psi_n(r, \mu_n) = \frac{1}{r} \sin \frac{\mu_n(r - R_1)}{R_2 - R_1} + \frac{\mu_n R_1}{r(R_2 - R_1)} \cos \frac{\mu_n(r - R_1)}{R_2 - R_1}, \quad (4)$$

а μ_n – положительные корни уравнения

$$\operatorname{ctg} \mu = \frac{\mu R_1 R_2}{(R_2 - R_1 + h R_1 R_2)} - \frac{(h R_2 - 1)(R_2 - R_1)}{\mu(R_2 - R_1 + h R_1 R_2)}, \quad (5)$$

в результате чего получим

$$\frac{d\bar{\theta}(\mu_n, t)}{dt} = a \left[R_2^2 \sin \mu_n h \theta_0 \frac{(R_2 - R_1)^2 + \mu_n^2 R_1^2}{(R_2 - R_1)^2 (R_2 - R_1 + h R_1 R_2)} - \left(\frac{\mu_n}{(R_2 - R_1)} \right)^2 \bar{\theta}(\mu_n, t) \right]. \quad (6)$$

Решением уравнения (6) является

$$\bar{\theta}(\mu_n, t) = \frac{h R_2^2 \sin \mu_n}{\mu_n^2} \cdot \frac{(R_2 - R_1)^2 + \mu_n^2 R_1^2}{R_2 - R_1 + h R_1 R_2} \theta_0 \left(1 - \exp \left(- \frac{a \mu_n^2}{(R_2 - R_1)^2} t \right) \right). \quad (7)$$

Применяя к (7) формулу обращения

$$\bar{\theta}(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Psi_n(r, \mu_n)}{\|\Psi_n\|^2} \bar{\theta}(\mu_n, t), \quad (8)$$

где

$$\|\Psi_n\|^2 = \left(\begin{aligned} & \left[\mu_n^2 R_1^2 + (R_2 - R_1)^2 \left[\mu_n^2 R_2^2 + (R_2 - R_1)^2 (h R_2 - 1) + \right. \right. \\ & \left. \left. + R_2 (h R_2 - 1)(R_2 - R_1) \right] + \right. \\ & \left. + R_1 (R_2 - R_1) \left[\mu_n^2 R_2^2 + (R_2 - R_1)^2 (h R_2 - 1)^2 \right] \right) \times \\ & \times \left(2(R_2 - R_1) \left[\mu_n^2 R_2^2 + (R_2 - R_1)^2 (h R_2 - 1) \right]^2 \right)^{-1}, \end{aligned} \right) \quad (9)$$

окончательно получим

$$\begin{aligned}
 \theta(r, t) = & 2\theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} hR_2^2 \frac{\sin \mu_n}{\mu_n^2} \cdot \frac{(R_2 - R_1)^2 + \mu_n^2 R_1^2}{R_2 - R_1 + hR_1 R_2} (R_2 - R_1) \times \\
 & \times \left(\mu_n^2 R_2^2 + (R_2 - R_1)^2 (hR_2 - 1)^2 \right) \times \\
 & \times \left[\frac{1}{r} \sin \frac{\mu_n (r - R_1)}{R_2 - R_1} + \frac{\mu_n R_1}{r(R_2 - R_1)} \cos \frac{\mu_n (r - R_1)}{R_2 - R_1} \right] \times \\
 & \times \left(1 - \exp \left(- \frac{a\mu_n^2}{(R_2 - R_1)^2} t \right) \right) \times \\
 & \times \left\{ \left[\mu_n^2 R_1^2 + (R_2 - R_1)^2 \right] \left[\mu_n^2 R_2^2 + (R_2 - R_1)^2 (hR_2 - 1)^2 + \right. \right. \\
 & \left. \left. + R_2 (hR_2 - 1)(R_2 - R_1) \right] + \right. \\
 & \left. + R_1 (R_2 - R_1) \left[\mu_n^2 R_1^2 + (R_2 - R_1)^2 (hR_2 - 1)^2 \right] \right\}^{-1}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Это выражение по смыслу [8] представляет собой локальную переходную функцию терморезистивного ЧЭ. Информация на выходе таких ЧЭ соответствует среднеобъемному значению входного сигнала, т.е.

$$\theta(t) = \frac{3}{R_2^3 - R_1^3} \int_{R_1}^{R_2} r^2 \theta(r, t) dr. \tag{11}$$

Если в этом выражении под знаком интеграла используется (10), то выражение (11) представляет собой усредненную по объему переходную функцию терморезистивного ЧЭ, выполненного в виде сферы.

Подставляя (10) в (11), после ряда преобразований получаем выражение для переходной функции ЧЭ в следующем виде

$$\begin{aligned}
 \theta(t) = & \theta_0 \frac{6Bi}{1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^3} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n}{\mu_n^3} \cdot \frac{\left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) + \mu_n^2 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2}{1 - \frac{R_1}{R_2} (1 - Bi)} \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) \times \\
 & \times \left[\left(\mu_n^2 \frac{R_1}{R_2} + \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right)^2 \right) \sin \mu_n - \mu_n \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right)^2 \cos \mu_n \right] \times \\
 & \times \left(1 - \exp \left(- \frac{a\mu_n^2}{R_2^2} \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right)^{-2} t \right) \right) \times \\
 & \times \left\{ \left[\mu_n^2 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 + \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right)^2 \right] \left[1 - \frac{(1 - Bi) \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right)}{\mu_n^2 + (1 - Bi)^2 \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right)^2} \right] + \frac{R_1}{R_2} \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) \right\}^{-1},
 \end{aligned} \tag{12}$$

где $Bi = hR_2$ – критерий Био.

С учетом обозначений, принятых в (12), уравнение (5) трансформируется к виду

$$ctg \mu = \frac{\mu^2 \frac{R_1}{R_2} + (1 - Bi) \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right)^2}{\mu \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right) \left(1 - \frac{R_1}{R_2} (1 - Bi)\right)}, \quad (13)$$

В табл. 1 приведены значения первого корня μ_1 уравнения (13) для $0,01 \leq Bi \leq 1,0$ и $0,2 \leq \frac{R_1}{R_2} \leq 0,9$.

Анализ данных этой таблицы свидетельствует о том, что с уменьшением толщины сферы, т.е. при $R_1 \rightarrow R_2$, значения корней уравнений (13) уменьшаются.

Определим локальную передаточную функцию ЧЭ, которая согласно [8] имеет вид

$$W(r, p) = \theta_0^{-1} pL(\theta(r, t)), \quad (14)$$

где L – оператор интегрального преобразования Лапласа.

Таблица 1 – Значения корней μ_1

$\frac{R_1}{R_2}$	Bi				
	0,01	0,05	0,1	0,5	1,0
0,2	0,1392	0,3059	0,4367	0,9377	1,2648
0,4	0,1076	0,2384	0,3366	0,7278	0,9857
0,6	0,0783	0,1749	0,2458	0,5354	0,7352
0,8	0,0496	0,1342	0,1563	0,3446	0,4801
0,9	0,0328	0,0743	0,1052	0,2336	0,3267

Применение интегрального преобразования Лапласа к (10), а также учет (14) приводит к следующему выражению

$$W(r, p) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{D_n}{T_n p + 1}, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned}
 D_n = & \frac{2hR_2^2 \sin \mu_n}{\mu_n^2} \cdot \frac{(R_2 - R_1)^2 + \mu_n^2 R_1^2}{R_2 - R_1 + hR_1 R_2} (R_2 - R_1) \times \\
 & \times \left(\mu_n^2 R_2^2 + (R_2 - R_1)^2 (hR_2 - 1)^2 \right) \times \\
 & \times \left[\frac{1}{r} \sin \frac{\mu_n (r - R_1)}{R_2 - R_1} + \frac{\mu_n R_1}{r(R_2 - R_1)} \cos \frac{\mu_n (r - R_1)}{R_2 - R_1} \right] \times \\
 & \times \left\{ \left[\mu_n^2 R_1^2 + (R_2 - R_1)^2 \right] \left[\mu_n^2 R_2^2 + (R_2 - R_1)^2 (hR_2 - 1)^2 + \right. \right. \\
 & \left. \left. + R_2 (hR_2 - 1)(R_2 - R_1) \right] + \right. \\
 & \left. + R_1 (R_2 - R_1) \left[\mu_n^2 R_2^2 + (R_2 - R_1)^2 (hR_2 - 1)^2 \right] \right\};
 \end{aligned} \tag{16}$$

$$T_n = \frac{R_2^2}{a\mu_n^2} \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right)^2. \tag{17}$$

Величины D_n и T_n имеют смысл n -х коэффициентов передачи и постоянной времени соответственно.

Использование модели (15) позволяет по известному закону изменения температуры окружающей среды определять распределение температуры в произвольной точке ЧЭ.

При построении ДПИ на основе таких ЧЭ их выходной сигнал определяется среднеобъемным значением температуры, вследствие чего целесообразно перейти от (15) к передаточной функции ЧЭ, усредненной по объему. В этом случае будет иметь место

$$W(p) = \frac{3}{R_2^3 - R_1^3} \int_{R_1}^{R_2} r^2 W(r, p) dr = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{M_n}{T_n p + 1}, \tag{18}$$

где M_n – n -й коэффициент передачи, определяемый выражением

$$M_n = \frac{6Bi \sin \mu_n}{\left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^3 \right] \mu_n^3} \cdot \frac{\left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) + \mu_n^2 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2}{1 - \frac{R_1}{R_2} (1 - Bi)} \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) \times$$

$$\begin{aligned} & \times \left[\left(\mu_n^2 \frac{R_1}{R_2} + \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) \right) \sin \mu_n - \mu_n \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right)^2 \cos \mu_n \right] \times \\ & \times \left\{ \left[\mu_n^2 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 + \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right)^2 \right] \left[1 - \frac{(1 - Bi) \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right)}{\mu_n^2 + (1 - Bi)^2 \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right)^2} \right] + \frac{R_1}{R_2} \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) \right\}^{-1} \end{aligned} \quad (19)$$

Следует заметить, что ряд (19) для малых значений критерия Био сходится достаточно быстро. Поэтому в первом приближении можно ограничиться первым членом этого ряда, а для оценки быстродействия ЧЭ такого типа можно использовать соотношение [8]

$$\tau \cong 3T_1, \quad (20)$$

где T_1 определяется выражением (17) при $n = 1$.

На рис. 1 приведена зависимость относительной постоянной времени $T_1 R_2^{-2}$ от критерия Био – Bi и отношения радиусов сферы – R_1/R_2 . Эта зависимость приведена для медного ЧЭ, для которого $a = 1,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$.

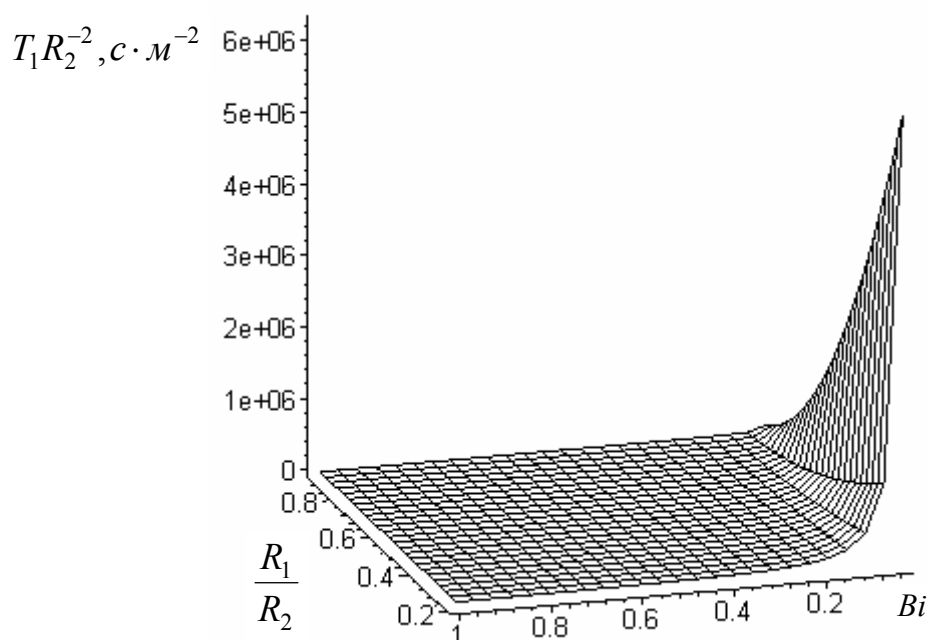


Рис. 1 – Зависимость $T_1 R_2^{-2} = \varphi(Bi, R_1/R_2)$

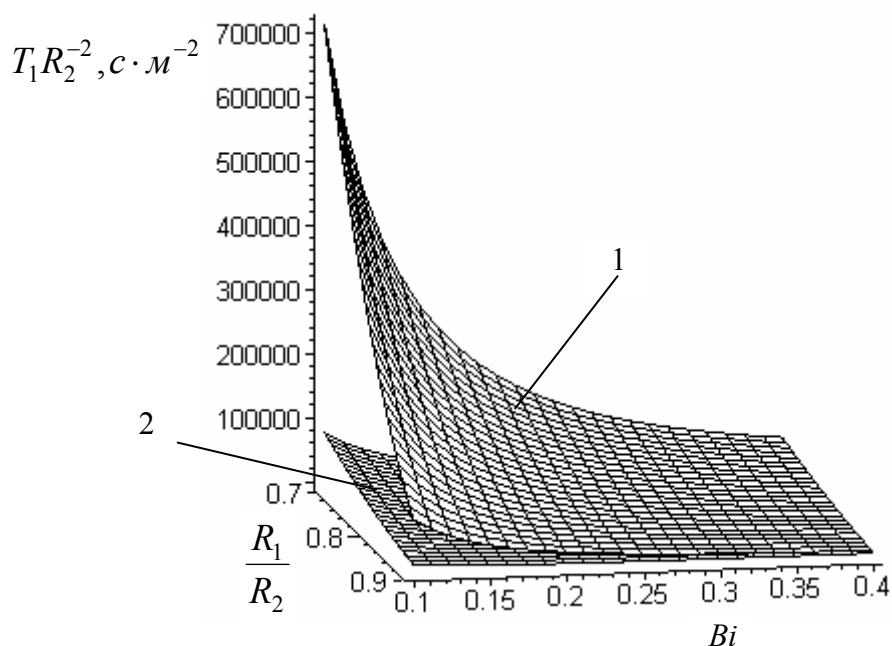


Рис. 2 – Зависимость $T_1 R_2^{-2} = \varphi(Bi, \frac{R_1}{R_2})$: 1 – сталь; 2 – медь

Анализ этой зависимости свидетельствует о том, что быстродействие терморезистивного ЧЭ, выполненного в виде сферы, уменьшается с увеличением стенки сферы и с уменьшением значения критерия критерия Био. В частности, при $Bi < 0,2$, быстродействие таких ЧЭ может уменьшаться на несколько порядков.

На рис. 2 приведены зависимости $T_1 R_2^{-2} = \varphi(Bi, \frac{R_1}{R_2})$, полученные для стального ($a = 1,26 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$) и медного ЧЭ. Из анализа этой зависимости следует, что для тонкостенных сферических ЧЭ ДПИ при $Bi \geq 0,3$ их быстродействие практически не зависит от теплофизических характеристик материала чувствительного элемента.

Для съема информации с ЧЭ целесообразно использовать ДСИ в виде мостовой измерительной схемы постоянного тока – рис. 3. С целью реализации равноплечного моста необходимо, чтобы имело место

$$R_0 = R_1 + R_{\text{ЧЭ}}, \quad (21)$$

где R_1 – балластное сопротивление; $R_{\text{ЧЭ}}$ – электрическое сопротивление ЧЭ при температуре T_0 .

На схеме ДСИ введены следующие обозначения: $R_{\text{П}}$ – сопротивление измерительно-преобразовательного тракта; U – напряжение электропитания; $U_{\text{ВЫХ}}$ – выходной сигнал, который равен

$$U_{ВЫХ} = \frac{R_{II}U}{4R_0(R_0 + R_{II}) + \Delta R(3R_0 + R_{II})} \Delta R, \quad (22)$$

где $\Delta R = R_{\text{ЧЭ}}\alpha\theta$ – приращение сопротивления ЧЭ, обусловленное изменением температуры на величину θ (α – температурный коэффициент сопротивления (ТКС) материала ЧЭ).

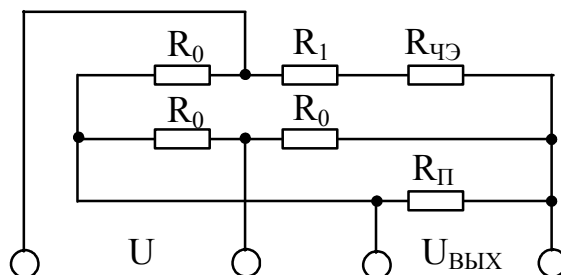


Рис. 3 – Схема датчика съема информации с терморезистивного ЧЭ

Вследствие малости величины ΔR , выражение (22) можно записать в виде

$$U_{ВЫХ} = K_D\theta, \quad (23)$$

где $K_D = \frac{R_{II}R_{\text{ЧЭ}}\alpha U}{4R_0(R_0 + R_{II})}$ – коэффициент передачи датчика съема информации.

Из этого выражения следует, что ДСИ является безынерционным звеном.

Учитывая, что выходным каскадом ДПИ является усилитель, т.е. тоже безынерционное звено, то быстродействие ДПИ будет определяться инерционными свойствами терморезистивного ЧЭ. В частности, для сферического терморезистивного ЧЭ, выполненного из меди и имеющего параметры – $R_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $Bi = 0,1$, $R_1/R_2 = 0,2$ и $R_1/R_2 = 0,9$, оценка быстродействия ДПИ будет составлять для толстостенного варианта порядка 40 мс и порядка 12 мс для тонкостенного варианта исполнения чувствительного элемента.

Выводы. Применительно к ДПИ САП, в качестве чувствительного элемента которого используется сфера, показано, что быстродействие датчика определяется инерционными свойствами терморезистивного ЧЭ. Получены математические модели таких ЧЭ, которые принадлежат к классу

локальных и усредненных по объему сферы моделей. Оба класса моделей представлены в виде переходных функций и в виде передаточных функций, что позволило выразить оценку быстродействия ДПИ такого типа через величину постоянной времени ЧЭ.

Установлено, что повышение быстродействия ДПИ такого типа целесообразно повышать за счет применения тонкостенных чувствительных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Walton D.W., Thomas P.H., Estimating Temperatures in Compartment Fires // SEPE Handbook of Fire Protection Engineering. Section 3, Chapter 06, 3rd Edition, 2002.
2. Ми Зуй Тхань. Возникновение и развитие пожаров в жилых помещениях // Пожаровзрывобезопасность. – 2005. – Т.14. – № 3. – С. 59 – 63.
3. Буцынская Т.А. Анализ направлений совершенствования пожарной сигнализации на основе патентной информации // Пожаровзрывобезопасность. – 2005. – Т.14. – № 3. – С. 75 – 77.
4. Абрамов Ю.А., Куриный Е.В. Точечные тепловые пожарные извещатели максимального типа. – Х.: АГЗУ, 2005. – 129 с.
5. Садковой В.П., Абрамов Ю.А., Одарюк П.В. Модели терморезистивных чувствительных элементов систем автоматического пожаротушения // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр-ов. – Х.: АГЗУ, 2005. – Вып. 18. – С. 215 – 222.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
7. Карташов О.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердого тела. – М.: Высшая школа, 2001. – 550 с.
8. Абрамов Ю.А. Основы пожарной автоматики. – Харьков: Мин. образ. Украины, 1993. – 288 с.

