

В. Л. МУРЗИНОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет (Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84; e-mail: dr.murzinov@yandex.ru)

УДК 697.112.2

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ОБЪЕМЕ ПОМЕЩЕНИЯ

Показано, что многие тепловые задачи научного и прикладного характера нуждаются в информации о распределении температуры в газовой среде. Поскольку температурные поля могут быть нестационарными, то часто требуется знание динамики их изменения, однако существующие методы не всегда позволяют получить динамические характеристики изменения температурного поля. Рассмотрен метод построения температурного поля газовой среды в объеме помещения. Показано, что температура газовой среды в контрольных точках может определяться температурой поверхности датчика. Решена задача определения динамики изменения температурного поля по температуре поверхности датчика, выполненного в форме плоской пластины. Показана возможность определения точности значений температуры, получаемых в контрольных точках объема помещения.

Ключевые слова: температурное поле; нагрев плоской пластины; уравнение теплопроводности; метод Фурье; коэффициент теплоотдачи; коэффициент теплопроводности.

DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.39-44

Проблема определения температурного поля в объеме помещения возникает при исследовании и анализе параметров микроклимата в помещении, динамики изменения температурного режима в процессе развития пожара [1–3], состояния технологического теплового процесса и т. д.

На сегодняшний день известны различные методы построения температурного поля в некотором объеме газовой среды [4, 5]. Например, устройство для измерения температурного поля газового потока [6] включает преобразователь температуры и тепловизионную камеру. Преобразователь температуры выполнен в виде сетки из нитей, коэффициент теплопроводности которой приблизительно равен коэффициенту теплопроводности газовой среды. Температурное состояние преобразователя, соответствующее температурному состоянию газовой среды, фиксируется тепловизионной камерой. Изображение картины температурного поля подвергается обработке с целью получения его числовых значений. К сожалению, этот метод позволяет определять значения теплового поля только для высокотемпературных процессов, что, естественно, сужает область его применения. Кроме того, сложно получить в числовом представлении динамику изменения температурного поля, так как не все участки поверхности доступны для сканирования тепловизионной камерой. Иногда используются численные методы исследования температурных полей [7].

Существует способ измерения пространственного распределения температуры, а устройство для его реализации описано в [8]. Для измерения температуры в контрольных точках используются термочувствительные кварцевые датчики, проводники, генераторы качающейся частоты, контроллеры, устройства отображения информации. С помощью этого метода можно проследить динамику изменения температурного поля, но аппаратное оформление метода сложно и громоздко: каждый датчик должен быть гальванически соединен с генератором, контроллером и устройством отображения информации, что не всегда возможно в больших помещениях. Кроме того, каждый датчик должен пройти процедуру тарировки.

В целях повышения эффективности определения температурного поля в объеме помещения целесообразно в качестве датчиков температуры воздуха использовать не кварцевые датчики, а простые по конструкции, весьма тонкие (не более 0,1 мм) металлические пластины, которые располагают в контрольных точках. Измерение температуры осуществляется бесконтактным способом с помощью пирометра, позволяющего определить температуру газовой среды по температуре поверхности датчика, сформировать ее числовое значение в течение долей секунды и передать его в вычислительное устройство. На рис. 1 представлена конструктив-

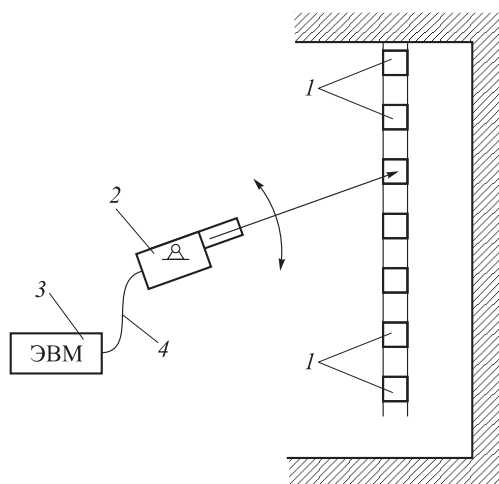


Рис. 1. Конструктивная схема устройства для измерения температурного поля в помещении: 1 — датчики (тонкие металлические пластины); 2 — пирометр; 3 — компьютер; 4 — соединительная шина

ная схема устройства для измерения температурного поля в помещении с разрезом последнего.

Этот способ определения температурного поля в объеме помещения реализуется следующим образом. Датчики помещают в контрольные точки в объеме помещения. Пирометр соединяют с ЭВМ и устанавливают в положение, из которого удобно последовательно сканировать поверхности всех датчиков. После сканирования полученные значения температуры передаются на ЭВМ, в которой фиксируются координаты положения датчиков, температуры их поверхностей и временной момент получения данных значений. Температура поверхности датчика соответствует температуре окружающей его среды. На рис. 2 показаны графики переходного процесса, т. е. характерного изменения температуры поверхности датчика. На графиках видно, что при любом соотношении начальной температуры поверхности датчика и температуры окружающей среды спустя некоторое время наступает равенство этих значений. Продолжительностью этого времени определяется точность получаемых результатов, поэтому необходимо минимизировать длительность переходного процесса.

Более детальный анализ изменения температуры датчика может быть проведен на основе математической модели температурного поля внутренней структуры датчика. С позиции моделирования датчик представляет собой достаточно тонкую пластину, у которой толщина намного меньше других конечных размеров, что допускает рассматривать ее как пластину неограниченной протяженности толщиной $2R$ [9]. В начальный момент времени τ пластину помещают в среду с постоянной температурой t_c . Начальная температура пластины t_n . При этом выполняется условие $t_c > t_n$. Между ограничивающими поверхностями пластины и окружающей средой про-

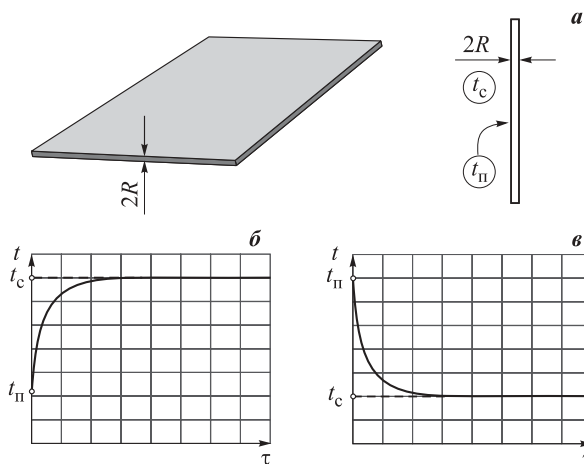


Рис. 2. Схема датчика в виде пластины (а) и графики изменения температуры на его поверхности при $t_c > t_n$ (б) и $t_n > t_c$ (в)

исходит теплообмен по закону Ньютона. Необходимо найти распределение температуры по толщине пластины, а также время, за которое достигается значение температуры на поверхности пластины, равное температуре окружающей среды, с погрешностью, не превышающей 5 %.

Запишем уравнение теплопроводности [9]:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $t(x, \tau)$ — распределение температуры по толщине пластины;

x — координата;

τ — время;

a — коэффициент температуропроводности;

$a = \lambda / (c_p \rho)$;

λ — коэффициент теплопроводности;

c_p — теплоемкость материала пластины;

ρ — плотность материала пластины.

Введем в рассмотрение относительную температуру вида

$$T(x, \tau) = t_c - t(x, \tau). \quad (2)$$

Для расчетной схемы на рис. 3 приняты начальные условия $x = \pm R$ и $\tau = 0$:

$$\left. \begin{aligned} t(\pm R, \tau = 0) &= t_n \\ T(\pm R, \tau = 0) &= T_0 = t_c - t_n \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где T_0 — начальное значение относительной температуры.

Граничные условия основываются на предположении, что количество тепла, поступившего от окружающей среды к пластине, равно количеству тепла, распространяющегося по толщине пластины:

$$-\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_c - T(R, \tau)] = 0, \quad (4)$$

где α — коэффициент теплоотдачи.

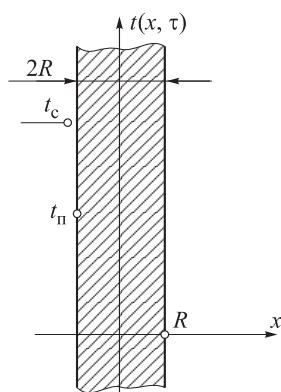


Рис. 3. Расчетная схема для определения распределения температуры в структуре тонкой пластины

С учетом (2) уравнение (1) примет вид:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}. \quad (5)$$

Для решения уравнения (5), являющегося дифференциальным уравнением в частных производных второго порядка, применим метод разделения переменных [9]. Решение уравнения (5) представим в виде произведения двух функций:

$$T(x, \tau) = X(x) K(\tau). \quad (6)$$

Подстановка (6) в (5) даст выражение

$$X(x) \frac{\partial K(\tau)}{\partial \tau} = a K(\tau) \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2};$$

$$\frac{1}{K(\tau)} \frac{\partial K(\tau)}{\partial \tau} = \frac{a}{X(x)} \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} = -k^2,$$

откуда получим два обыкновенных дифференциальных уравнения:

$$\frac{dK(\tau)}{d\tau} + k^2 K(\tau) = 0; \quad (7)$$

$$\frac{d^2 X(x)}{dx^2} + \frac{k^2}{a} X(x) = 0, \quad (8)$$

где k — произвольно выбранная константа.

Решениями уравнений (7) и (8) будут соответственно выражения [10, 11]:

$$K(\tau) = C_1 \exp(-k^2 \tau); \quad (9)$$

$$X(x) = C_2 \sin\left(\frac{k}{\sqrt{a}} x\right) + C_3 \cos\left(\frac{k}{\sqrt{a}} x\right), \quad (10)$$

где C_1-C_3 — константы, которые в дальнейшем будут определены.

После подстановки (9) и (10) в (6) получим

$$T(x, \tau) = \exp(-k^2 \tau) \times \left[B_1 \sin\left(\frac{k}{\sqrt{a}} x\right) + B_2 \cos\left(\frac{k}{\sqrt{a}} x\right) \right], \quad (11)$$

где $B_1 = C_2 C_1$; $B_2 = C_3 C_1$.

Для определения констант в уравнении (11) учтем начальные условия (3) и запишем систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} T(R, 0) &= T_0 = \exp(-k^2 \cdot 0) \times \\ &\times \left[B_1 \sin\left(\frac{k}{\sqrt{a}} R\right) + B_2 \cos\left(\frac{k}{\sqrt{a}} R\right) \right] \\ T(-R, 0) &= T_0 = \exp(-k^2 \cdot 0) \times \\ &\times \left[B_1 \sin\left(\frac{k}{\sqrt{a}} (-R)\right) + B_2 \cos\left(\frac{k}{\sqrt{a}} (-R)\right) \right] \end{aligned} \right\},$$

откуда

$$B_1 = 0, \quad B_2 = \frac{T_0}{\cos\left(\frac{k}{\sqrt{a}} R\right)}. \quad (12)$$

Для определения неизвестной величины k воспользуемся граничным условием (4), в котором определим входящие в него параметры:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} = -\exp(-k^2 \tau) \times \left[B_1 \cos\left(\frac{k}{\sqrt{a}} x\right) \frac{k}{\sqrt{a}} - B_2 \sin\left(\frac{k}{\sqrt{a}} x\right) \frac{k}{\sqrt{a}} \right]; \quad (13)$$

$$T(R, \tau) = \exp(-k^2 \tau) \times \left[B_1 \sin\left(\frac{k}{\sqrt{a}} R\right) + B_2 \cos\left(\frac{k}{\sqrt{a}} R\right) \right]. \quad (14)$$

Теперь с учетом (13) и (14) уравнение (4) можно записать в виде:

$$\lambda \exp(-k^2 \tau) \left[B_1 \cos\left(\frac{k}{\sqrt{a}} x\right) \frac{k}{\sqrt{a}} - B_2 \sin\left(\frac{k}{\sqrt{a}} x\right) \frac{k}{\sqrt{a}} \right] + \alpha \left[t_c - \exp(-k^2 \tau) \left[B_1 \sin\left(\frac{k}{\sqrt{a}} R\right) + B_2 \cos\left(\frac{k}{\sqrt{a}} R\right) \right] \right] = 0. \quad (15)$$

Учитывая значения констант (12) и условия $x = R$, $\tau = 0$, уравнение (15) запишем в виде

$$\frac{\lambda}{\alpha} \frac{k}{\sqrt{a}} \operatorname{tg}\left(\frac{k}{\sqrt{a}} R\right) = \frac{t_c - T_0}{T_0}. \quad (16)$$

Уравнение (16) можно записать в безразмерном виде, введя следующие замены: безразмерный комплекс $\mu = (k/\sqrt{a})R$; критерий Био $Bi = (\alpha/\lambda)R$; безразмерная начальная температура теплового процесса $\xi_t = (t_c - T_0)/T_0$:

$$\operatorname{tg}(\mu) = \xi_t Bi / \mu. \quad (17)$$

Уравнение (17) является трансцендентным, но, учитывая малые значения искомой величины μ , левую часть уравнения разложим в ряд:

$$\mu^4 + \mu^2 - 3\xi_t Bi = 0. \quad (18)$$

Решением уравнения (18) будет корень, дающий действительное, положительное значение μ :

$$\mu = \left(\frac{1}{2} \sqrt{9 + 12\xi_t Bi} - \frac{3}{2} \right)^{1/2}. \quad (19)$$

Из условия (2) имеем $t(x, \tau) = t_c - T(x, \tau)$. Тогда, учитывая (11), (12) и (19), можно записать искомое решение следующим образом:

$$t(x, \tau) = t_c - T_0 \exp\left(-\frac{\mu^2 a}{R^2} \tau\right) \frac{\cos\left(\mu \frac{x}{R}\right)}{\cos(\mu)}. \quad (20)$$

Изменение температуры на поверхности пластины определится при $x = R$, и уравнение (20) примет вид:

$$t(R, \tau) = t_c - T_0 \exp\left(-\frac{\mu^2 a}{R^2} \tau\right). \quad (21)$$

Для построения графика изменения температуры поверхности датчика были приняты параметры, представленные в таблице. По уравнению (21) с учетом данных таблицы построена графическая зависимость изменения температуры поверхности датчика (рис. 4). На этом графике показана также граница 5 %-ной погрешности достижения температуры среды в контрольной точке и, соответственно, время достижения этой границы.

Из уравнения (21) определим время достижения границы 5 %-ной погрешности:

$$\tau = -\frac{1}{\mu^2 a} \ln\left(0,05 \frac{t_c}{t_c - t_{II}}\right) R^2.$$

С учетом данных таблицы получим $\tau = 0,26$ с.

Рассмотренный метод измерения температуры газовой среды в объеме помещения отличается неплохим быстродействием. Поверхность датчика нагревается до температуры окружающей его газовой среды за 0,26 с, т. е. частота отклика датчика на изменение температуры составляет $0,26 \text{ с}^{-1}$. Кроме того, нужно учесть время, затрачиваемое самим пирометром на формирование значения измеренной

Параметры датчика

Параметр	Значение
Материал	Алюминий
Плотность ρ , кг/м ³	2700
Теплоемкость c_p , Дж/(кг·К)	930
Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К)	209
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	203,5
Толщина датчика $2R$, м	$2 \cdot 10^{-5}$
Температура среды t_c , К	70
Начальная температура датчика t_{II} , К	20

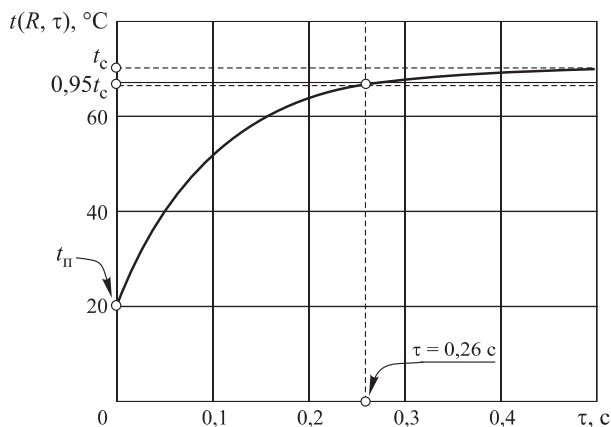


Рис. 4. Изменение температуры поверхности датчика $t(R, \tau)$

на поверхности датчика температуры. Например, если в качестве пирометра использовать бесконтактные термометры фирмы TESTO с частотой измерений $0,5 \text{ с}^{-1}$, то общая частота измерений составит $0,76 \text{ с}^{-1}$. Таким образом, за 1 мин система сможет выполнить около 80 измерений, т. е. можно получить достаточно объективную картину динамики изменения температуры газовой среды в помещении. Эта информация может быть использована в системах контроля, сигнализации и управления пожарной безопасностью, а также в научных исследованиях, связанных с изучением тепловых процессов в газовых средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурзинов В. Л., Паршин М. В., Паршина А. П. Моделирование температурного режима пожара с учетом работы вентиляции в негерметичном помещении // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 6. — С. 56–60.
2. Мурзинов В. Л., Паршин М. В. Моделирование температуры в помещении при наличии открытого пламени в условиях свободной конвекции // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 12. — С. 28–33.
3. Есин В. М., Калмыков С. П. Сравнение методик расчета требуемых параметров вентиляционных систем противодымной защиты многоэтажных зданий // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 6. — С. 47–52.
4. Zhang Y., Yang H. Temperature field and refrigeration output of thermoelectric arm // Advanced Materials Research. — 2012. — Vol. 374–377. — P. 508–511. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.374-377.508.

5. Shein E. V., Bannikov M. V., Troshina O. V., Churkina O. A. Temperature field of complex soilscapes (by the example of the Vladimir opolie region) // Eurasian Soil Science. — 2009. — Vol. 42, No. 2. — P. 129–136. DOI: 10.1134/s1064229309020033.
6. Пат. 2230300 Российская Федерация. МПК G01K 13/02. Устройство для измерения температурного поля газового потока / Жилкин Б. П., Ларионов И. Д., Шуба А. Н.; заявитель и патентообладатель Жилкин Б. П., Ларионов И. Д., Шуба А. Н. — № 2002109369/28; заявл. 10.04.2002; опубл. 10.06.2004, Бюл. № 16. — 5 с.
7. Li Y. B., Zhou T., Huo Q. J., Yang X. Numerical simulation research of velocity and temperature fields in high temperature flow of liquid lead-bismuth eutectic // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 541–542. — P. 1333–1337. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.541-542.1333.
8. Заявка 2011150287/28 Российская Федерация. МПК G01K 7/00. Способ измерения пространственного распределения температуры и устройство для его осуществления / Селянин С. Г.; заявитель и патентообладатель Селянин С. Г.; заявл. 01.12.2011; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 16. — 6 с.
9. Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М. : Высшая школа, 1967. — 400 с.
10. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. — СПб. : Изд-во “Лань”, 2003. — 576 с.
11. Зайцев В. Ф., Полянин А. Д. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. — М. : Физматлит, 2001. — 576 с.

Материал поступил в редакцию 11 августа 2015 г.

Для цитирования: Мурзинов В. Л. Метод построения температурного поля в объеме помещения // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 11. — С. 39–44. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.39-44.

English

METHOD OF CONSTRUCTION OF THE TEMPERATURE FIELD IN VOLUME OF THE PREMISE

MURZINOV V. L., Doctor of Technical Sciences, Professor of Fire and Industrial Department, Voronezh State University of Architecture and Construction (20-letiya Oktyabrya St., 84, Voronezh, 394006, Russian Federation; e-mail address: dr.murzinov@yandex.ru)

ABSTRACT

The knowledge of a temperature field in volume of a premise is necessary at the analysis and researches of parameters of a microclimate, dynamics of a temperature mode of a fire, a condition of technological thermal process, etc. There are various methods of definition of a spatial temperature field of the gas environment in a premise. The most effective method is the method in which as gauges the thin plates possessing constructive simplicity are used. Thus the assumption is done, that the temperature of a surface of the gauges placed in control points is practically equal to temperature of the gas environment these points. The temperature of a surface of gauges is measured nonconductor with the help of a pyrometer. The offered assumption proves to be true mathematical model of heating of a thin plate in the gas environment of the set temperature. The equation of heating of a plate is received, and on the basis of this equation it is possible to define borders of an error of the measured temperature in control points. The value of this error depends on thickness of the gauge: the less thickness, the less value of an error, which can be taken temperature in control points fastly and more precisely.

Keywords: temperature field; heating of a flat plate; equation of heat conductivity, method Fourier; factor boiling heat; factor of heat conductivity.

REFERENCES

1. Murzinov V. L., Parshin M. V., Parshina A. P. Modelirovaniye temperaturnogo rezhima pozhara s uchetom raboty ventilyatsii v negermetichnom pomeshchenii [Modeling of temperature in fire regimes with a view of the work of emergency ventilation in permeable environment]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 6, pp. 56–60.

2. Murzinov V. L., Parshin M. V. Modelirovaniye temperatury v pomeshchenii pri nalichii otkrytogo plameni v usloviyakh svobodnoy konveksii [Modeling of temperature in the room at presence of the open flame in conditions of free convection]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 12, pp. 28–33.
3. Esin V. M., Kalmykov S. P. Sravneniye kharakteristik rascheta trebuyemykh parametrov ventilyatsionnykh sistem protivodymnoy zashchity mnogoetazhnykh zdaniy [Comparison of method of calculation of demanded parameters of ventilating systems of smoke control of multistoried buildings]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 6, pp. 47–52.
4. Zhang Y., Yang H. Temperature field and refrigeration output of thermoelectric arm. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 374–377, pp. 508–511. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.374-377.508.
5. Shein E. V., Bannikov M. V., Troshina O. V., Churkina O. A. Temperature field of complex soilscapes (by the example of the Vladimir opolie region). *Eurasian Soil Science*, 2009, vol. 42, no. 2, pp. 129–136. DOI: 10.1134/s1064229309020033.
6. Zhilkin B. P., Larionov I. D., Shuba A. N. *Ustroystvo dlya izmereniya temperaturnogo polya gazovogo potoka* [The device for measurement of a temperature field of a gas stream]. Patent RU, no. 2230300, 10.06.2004.
7. Li Y. B., Zhou T., Huo Q. J., Yang X. Numerical simulation research of velocity and temperature fields in high temperature flow of liquid lead-bismuth eutectic. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 541–542, pp. 1333–1337. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.541-542.1333.
8. Selyanin S. G. *Sposob izmereniya prostranstvennogo raspredeleniya temperatury i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Way of measurement of spatial distribution of temperature and the device for its realization]. Patent application RU, no. 2011150287/28, 10.06.2013.
9. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [The theory of heat conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 400 p.
10. Kamke E. *Spravochnik po obyknovennym differentsialnym uravneniyam* [The directory on the ordinary differential equations]. Saint Petersburg, Izdatelstvo “Lan”, 2003. 576 p.
11. Zaytsev V. F., Polyandin A. D. *Spravochnik po obyknovennym differentsialnym uravneniyam* [The directory on the ordinary differential equations]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 576 p.

For citation: Murzinov V. L. Metod postroyeniya temperaturnogo polya v obyeme pomeshcheniya [Method of construction of the temperature field in volume of the premise]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 11, pp. 39–44. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.11.39-44.

ГАДЖЕТ ДЛЯ ПОЖАРНЫХ

Light Ball разрабатывался специально для пожарных. Новшество заключается в том, что шар не только подсвечивает темные места, но и поглощает дым. Такой подход должен помочь пожарным в продвижении в затемненных и задымленных местах и уменьшить количество несчастных случаев во время пожаров.

В ходе спасательной операции эти устройства помогут не только быстро осмотреть помещение, но и дать возможность самим потерпевшим заметить присутствие пожарных или найти путь к выходу из помещения.



<http://prolite.ru/2014/08/28/light-ball/>