

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Н.П. Жуков¹, Н.Ф. Майникова², И.В. Рогов¹, О.Н. Попов¹

Кафедры: «Гидравлика и теплотехника» (1); *teplotehnika@nnn.tstu.ru*;
«Теория машин, механизмов и детали машин» (2), ГОУ ВПО «ТГТУ»

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: неразрушающий контроль; тепловое воздействие; теплофизические свойства.

Аннотация: Разработан метод неразрушающего контроля теплофизических характеристик твердых материалов. Метод применен на модели цилиндрического полупространства. Получено безразмерное представление температурной функции. Выполнен анализ результатов численного исследования с целью разработки режимов проведения эксперимента.

Обозначения и аббревиатуры

a – теплопроводность, м ² /с;	τ – время, с;
$2h$ – ширина полосы, м;	Θ – температура в безразмерном представлении;
\bar{q}_0 – плотность теплового потока, Вт/м ² ;	γ – число Эйлера;
T – температура, в точке поверхности, °С;	ИЗ – измерительный зонд;
x – координата, м;	ПМ – полимерный материал;
\bar{x} – безразмерная координата;	ТП – термоприемник;
F_0 – время в безразмерном представлении;	ТФС – теплофизические свойства.
λ – теплопроводность, Вт/(м·К);	

Введение

При определении ТФС материалов определенный интерес представляют неразрушающие методы с использованием линейного источника тепла, расположенного на поверхности полуограниченного в тепловом отношении объекта исследования [1, 2]. Методы, в которых тепловой источник действует на сравнительно небольшом участке объекта, оставляя после себя направленный тепловой поток, а следовательно, и нестационарное температурное возмущение, представляют собой широкие технологические возможности, позволяя определять независимо две теплофизические характеристики λ и a .

Достоинствами данных методов являются также сравнительная простота их технической реализации и малое время, необходимое для проведения эксперимента. Исследования в этой области на сегодняшний день остаются актуальными. Это определяется, прежде всего, тем, что ТФС материала определяют на основании косвенных экспериментов и рассчитывают по определенным математическим моделям. В результате точность и надежность определения ТФС во многом

обуславливается тем, насколько адекватно математическая модель описывает тепловые процессы, проходящие при измерении.

Данная работа посвящена теоретическому обоснованию процесса теплопроводности от линейного нагревателя в полуограниченном теле.

Математическая модель

Тепловая схема представлена на рис. 1. На поверхности полуограниченного в тепловом отношении тела расположен нагреватель в виде полосы шириной $2h$, через которую в материал подается тепловой поток \bar{q}_0 [2].

Температура T в точке с координатами поверхности $(x, 0)$ в момент времени τ будет определяться из выражения [1]

$$T(x, 0, \tau) = \frac{\bar{q}_0 h \text{Fo}^{0,5}}{\pi^{0,5} \lambda} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{h+x}{2h\text{Fo}^{0,5}} \right] + \operatorname{erf} \left[\frac{h-x}{2h\text{Fo}^{0,5}} \right] - \frac{h+x}{2h(\pi \text{Fo})^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[-\frac{(h+x)^2}{4h^2 \text{Fo}} \right] - \frac{h-x}{2h(\pi \text{Fo})^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[-\frac{(h-x)^2}{4h^2 \text{Fo}} \right] \right\}. \quad (1)$$

Выражение (1) в безразмерном виде

$$\Theta = \frac{\text{Fo}^{0,5}}{\pi^{0,5}} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{1+\bar{x}}{2\text{Fo}^{0,5}} \right] + \operatorname{erf} \left[\frac{1-\bar{x}}{2\text{Fo}^{0,5}} \right] - \frac{1+\bar{x}}{2(\pi \text{Fo})^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[-\frac{(1+\bar{x})^2}{4\text{Fo}} \right] - \frac{1-\bar{x}}{2(\pi \text{Fo})^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[-\frac{(1-\bar{x})^2}{4\text{Fo}} \right] \right\}, \quad (2)$$

где $\Theta = T(\bar{x}, 0, \tau)\lambda/\bar{q}_0 h$ – температура в безразмерном представлении; $\text{Fo} = a\tau/h^2$ – время в безразмерном представлении; $\bar{x} = x/h$ – безразмерная координата.

Для точки с координатами $(0; 0)$ выражение (2) примет вид

$$\Theta = \frac{2\text{Fo}^{0,5}}{\pi^{0,5}} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{1}{2\text{Fo}^{0,5}} \right] - \frac{1}{2(\pi \text{Fo})^{0,5}} \operatorname{Ei} \left[-\frac{1}{4\text{Fo}} \right] \right\}. \quad (3)$$

Используя следующие соотношения [1]:

$$\operatorname{erf}[x] = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{n!(2n+1)};$$

$$\operatorname{Ei}[-x] = \gamma + \ln(x) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-x)^n}{n n!},$$

получим выражение для температуры поверхности $z = 0$ в точке с координатой x для больших значений τ [2]

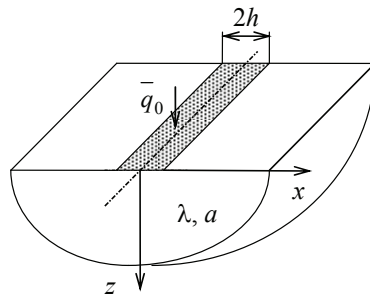


Рис. 1. Тепловая схема

$$T(x, 0, \tau) = \frac{\bar{q}_0 h}{\lambda \pi} \left\{ \ln(4a\tau) - \frac{h+x}{2h} \ln(h+x)^2 - \frac{h-x}{2h} \ln(h-x)^2 + 2 - \gamma \right\}. \quad (4)$$

Выражение (4) в безразмерной форме применительно к точке с координатами (0; 0) для больших значений τ имеет вид

$$\Theta = \frac{1}{\pi} [\ln(4Fo) + 2 - \gamma]. \quad (5)$$

Таким образом, получено безразмерное представление температурной функции. Найденное выражение (5) автоматически распространяется на бесконечное множество тепловых явлений применительно к схеме, представленной на рис. 1.

Измерительная схема

Измерительная схема метода представлена на рис. 2.

Рассмотрим два тела 1 и 2 с различными теплофизическими свойствами (λ_1, a_1 и λ_2, a_2). Размеры первого тела: длина – l_1 ; толщина – b_1 ; ширина – $2H_1$. Размеры второго тела: длина – l_2 ; толщина – b_2 ; ширина – $2H_2$. В плоскости контакта действует линейный источник тепла в виде полосы. Первое тело представляет собой исследуемый образец. Второе тело – подложка ИЗ. Начальная температура тел одинакова и равна T_0 . Источник тепла начинает действовать в начальный момент времени $\tau = 0$. В месте соприкосновения поверхностей тел 1 и 2 с нагревателем осуществляется идеальный тепловой контакт (см. рис. 2).

Тепловое воздействие осуществляется путем подачи на нагреватель электрического тока, мощность нагревателя – \bar{q}_0 . В ходе эксперимента фиксируется термограмма – зависимость разности температур T в точках контроля от времени τ .

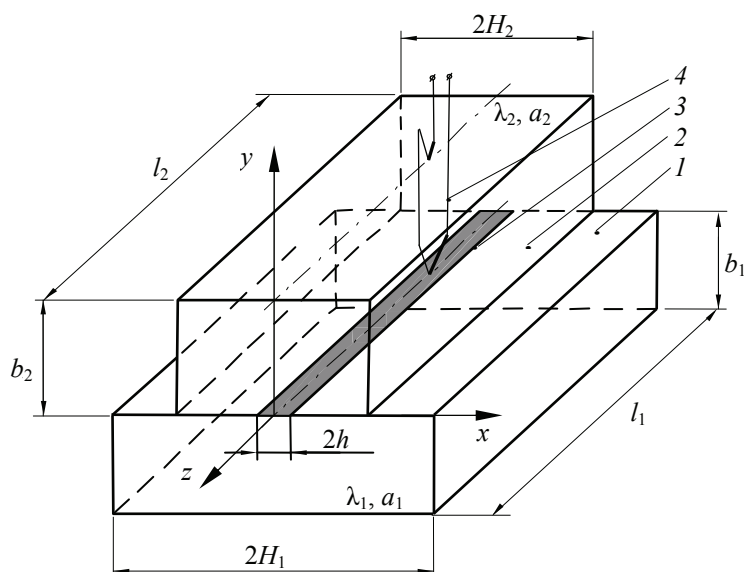


Рис. 2. Измерительная схема метода:
1 – изделие; 2 – измерительный зонд;
3 – нагреватель; 4 – термоприемник

Численная реализация метода

На рис. 3 представлены термограммы $\Theta = f(Fo)$. Кривая 1 получена численным решением задачи при соотношении $b_2/h = 5$ с помощью пакета ELCUT [5]. Кривые 2 и 3 получены по выражениям (3) и (5) с помощью пакета Maple.

На термограммах, представленных на рис. 3, выделены участки – I, II и III. Первый (I) участок термограммы характеризуется тем, что тепловой поток, проходящий через точку контроля, является переменным во времени и соответствует начальной стадии развития теплового процесса.

Второй (II) участок термограммы характеризуется регуляризацией теплового режима в локальной области нагревателя и ТП (см. рис. 2). Тепловой поток, проходящий через точки контроля, становится практически постоянным. Это позволяет использовать математическую модель (5) описания процесса теплопереноса для второго (рабочего) участка термограммы.

Третий (III) участок термограммы характеризуется тем, что нарушаются условия полуограниченности объекта исследования.

Графические зависимости $\Theta = f(Fo)$, полученные по формулам (3) и (5), а также численные решения для соотношений $b_2/h = 8; 5; 4; 3,5; 3$ собраны в семейство, представленное на рис. 4

На термограммах определены границы рабочих участков (см. рис. 4), зная которые для различных соотношений b_2/h , найдена зависимость $Fo^* = f(b_2/h)$ (рис. 5). По оси ординат (см. рис. 5) представлены значения Fo^* , соответствующие времени окончания второго (II) участка на термограммах 1–7.

Зависимость, представленная на рис. 5, позволяет определить размеры подложки измерительного зонда. Например, при $Fo^* = 12,3$ толщина подложки измерительного зонда $b_2 \geq 4,85$ мм.

Рассмотрим применение данного подхода при реализации разработанного метода определения ТФС ПМ. Известно, что значения теплопроводности полимеров λ находятся в диапазоне 0,2...0,8 Вт/(м·К). Следовательно, тепловое воздействие на образец не должно быть одинаково для различных образцов ПМ.

В выражении (2) значение безразмерной температуры можно выразить следующей зависимостью:

$$\Theta = T(\bar{x}, 0, \tau)\lambda/\bar{q}_0 h. \quad (6)$$

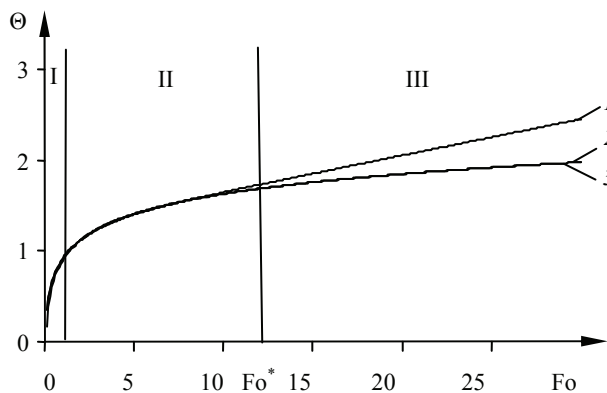


Рис. 3. $\Theta = f(Fo)$

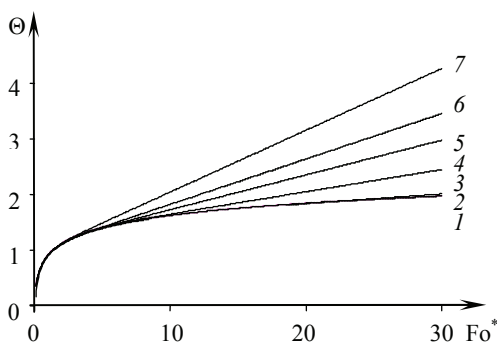


Рис. 4. Термограммы: 1, 2 – получены по формулам (3) и (5); 3–7 – получены численно при следующих соотношениях b_2/h : 8; 5; 4; 3,5; 3

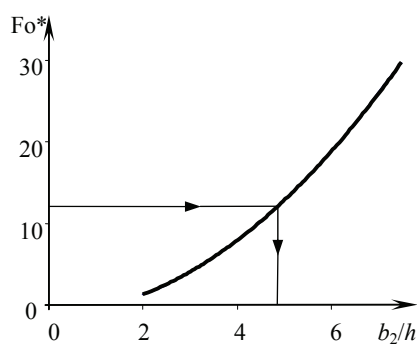


Рис. 5. $Fo^* = f(b_2/h)$

Нагрев исследуемой точки поверхности для различных ПМ (в зависимости от их теплопроводности) предлагается осуществлять на величину $\Delta T = 10 \dots 20$ °С. Причем, для наиболее теплопроводных материалов значение ΔT следует назначать равным 10 °С. Численное значение безразмерной температуры найдем из выражения (5).

Например, при $Fo^* = 12,3$

$$\Theta = \frac{1}{3,14} [\ln(4 \cdot 12,3) + 2 - 0,5772] = 1,694.$$

Для $\Delta T = 20$ °С значение

$$\bar{q}_0^* = \frac{20 \cdot 0,2}{1,694 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 2361,3 \text{ Вт/м}^2.$$

Сопротивление нагревателя

$$R^* = U^2 / Q, \quad (7)$$

где U – напряжение, равное 20 В; Q – тепловая мощность, Вт; $Q = \bar{q}_0 S$; \bar{q}_0^* – тепловой поток, Вт/м²; S – площадь плоского линейного нагревателя, м²; $S = 2hl$; $2h$ – ширина полосы, равная, например 0,002 м; l – длина полосы, равная, например 0,05 м.

$$R^* = \frac{U^2}{2\bar{q}_0^* hl} = \frac{20^2}{2 \cdot 2361,3 \cdot 0,001 \cdot 0,05} = 1694 \text{ Ом.}$$

Аналогично определены тепловой поток и сопротивление нагревателя для величины перегрева $\Delta T = 10$ °С:

$$\bar{q}_0^{**} = 4722,6 \text{ Вт/м}^2 \text{ и } R^{**} = 847 \text{ Ом.}$$

Из приведенных данных следует, что в зависимости от значения теплопроводности ПМ тепловое воздействие следует назначать в интервале значений $\bar{q}_0 = 2361,3 \dots 4722,6$ Вт/м², а сопротивление нагревателя при этом изменяется в интервале значений $R = 847 \dots 1694$ Ом.

Оптимальный временной интервал проведения измерений будет зависеть от значения температуропроводности исследуемого ПМ. Согласно справочным данным значения температуропроводности ПМ находятся в интервале $a = (0,01 \dots 0,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Из выражения $Fo = a\tau/h^2$ определены значения времени τ^* и τ^{**} , соответствующие длительности эксперимента при исследованиях ПМ с заявленными значениями температуропроводности:

$$\tau^* = \frac{12,3 \cdot 0,001^2}{0,02 \cdot 10^{-6}} = 615 \text{ с};$$

$$\tau^{**} = \frac{12,3 \cdot 0,001^2}{0,3 \cdot 10^{-6}} = 41 \text{ с}.$$

Численное исследование теплопереноса в полуограниченном теле от линейного источника тепла постоянной мощности позволило рассмотреть вопросы оптимизации процесса при применении разработанного метода для определения ТФС полимерных материалов.

Список литературы

1. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов [и др.] ; под общ. ред. Е.С. Платунова. – Л. : Машиностроение, 1986. – 256 с.
2. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.
3. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 487 с.
4. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1984. – 831 с.
5. ELCUT: моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.5. Руководство пользователя. – СПб. : Производственный кооператив ТОР, 2003. – 249 с.

Theoretical Substantiation of the Technique of Non-Destructive Control over Thermo-Physical Properties of Materials

N.P. Zhukov¹, N.F. Mainikova², I.V. Rogov¹, O.N. Popov¹

*Departments: "Hydraulics and Heat Engineering" (1); teplotehnika@nnn.tstu.ru;
"Theory of Machines, Mechanisms and Machine Parts" (2); TSTU*

Key words and phrases: non-destructive control; thermal influence; thermo-physical properties.

Abstract: The technique of non-destructive control over thermo-physical properties of solid materials is developed. The technique is applied to the model of cylindrical semi-sphere. Non-dimensional representation of temperature function is produced. The analysis of numeric examination of the results aimed at the development of experiment modes is carried out.

Theoretische Begründung der Methode der Unbruchkontrolle der wärme-physikalischen Eigenschaften der Stoffe

Zusammenfassung: Es ist die Methode der Unbruchkontrolle der wärme-physikalischen Charakteristiken der Hartstoffe erarbeitet. Die Methode wurde auf dem Modell des zylindrischen Halbraumes angewandt. Es ist die dimensionslose Vorstellung der Temperaturfunktion erhalten. Es ist die Analyse der Erzeugnisse der zahlenmäßigen Untersuchung mit Ziel der Erarbeitung der Regimes der Experimentdurchführung verwirklicht.

Argumentation théorique de la méthode du contrôle non destructif des propriétés thermophysiques des matériaux

Résumé: Est élaborée la méthode du contrôle non destructif des propriétés thermophysiques des matériaux solides. La méthode est appliqué sur le modèle du semi-espace cylindrique. Est obtenue la représentation démesurée de la fonction thermique. Est effectuée l'analyse des résultats de l'étude numérique dans le but de l'élaboration des régimes de la réalisation des expériences.

Авторы: *Жуков Николай Павлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидравлика и теплотехника»; *Майникова Нина Филипповна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Теория машин, механизмов и детали машин»; *Рогов Иван Владимирович* – кандидат технических наук, докторант кафедры «Гидравлика и теплотехника»; *Попов Олег Николаевич* – аспирант кафедры «Гидравлика и теплотехника», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Глинкин Евгений Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электрооборудование и автоматизация», ГОУ ВПО «ТГТУ».
