

**МНОГОСТАДИЙНЫЙ МЕТОД
И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

А.А. Чуриков, А.Ю. Сенкевич

Кафедра "Автоматизированные системы и приборы", ТГТУ

Ключевые слова и фразы: измерительный зонд; информационно-измерительная система; неразрушающий контроль; теплофизические свойства.

Аннотация: Описывается метод и реализующая его информационно-измерительная система многостадийного неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых теплоизоляционных материалов, обеспечивающие надежность и точность получаемых результатов за счет оперативного проведения многократных идентичных последовательных измерений. Приводятся теоретическая оценка погрешности метода, результаты экспериментальной проверки разработанной системы, поиска оптимальных условий и количества проводимых измерений в течение одного эксперимента.

Обозначения

<p>A, B - параметры функции начального распределения температуры;</p> <p>a - температуропроводность, м²/с;</p> <p>$f(r)$ - функция начального распределения температуры, К;</p> <p>$I(\tau)$ - интеграл начального распределения температуры, К;</p> <p>R - радиус нагревателя, м;</p> <p>r, z - пространственные координаты, м;</p> <p>T - температура, К;</p> <p>q - плотность теплового потока, Вт/м²;</p> <p>δ - относительная погрешность, %;</p> <p>λ - теплопроводность, Вт/(м·К);</p>	<p>τ - время, с;</p> <p>АЦП – аналого-цифровой преобразователь;</p> <p>ИВУ – измерительно-вычислительная система;</p> <p>ИИС – информационно-измерительная система;</p> <p>НК – неразрушающий контроль;</p> <p>ПЭВМ – персональная ЭВМ;</p> <p>ПИП – первичный измерительный преобразователь;</p> <p>ТФС – теплофизические свойства.</p>
--	--

Индексы

н - нагрев;
о - остывание;
с - сфера (полусфера).

Воспроизводимость численных значений контролируемых теплофизических свойств (ТФС) при проведении последовательных идентичных измерений на одном и том же исследуемом образце является наиболее эффективным подтверждением правильности найденного способа обеспечения надежности и достоверности получаемых результатов неразрушающего контроля (НК). Однако в этом случае необходимость продолжительного термостатирования образца для создания в нем равномерного начального распределения температуры перед каждым повторным измерением существенно отражается на производительности испытаний. Нами для обеспечения надежности и достоверности результатов теплофизических измерений при одновременном увеличении их производительности предлагается замена серии индивидуальных длительных тепловых экспериментов одним оперативным многостадийным эксперимен-

том, основанным на расчетных зависимостях ТФС, учитывающих неравномерное начальное распределение температуры на каждой стадии НК.

Рассмотрим вопросы, связанные с разработкой метода многостадийного НК ТФС.

Тепловое воздействие на исследуемый образец осуществляется плоским круглым нагревателем постоянной мощности и радиусом R , расположенным в плоскости контакта измерительного зонда с образцом (рис. 1). В этой же плоскости, как показано на рис. 1, размещаются и датчики температуры – термопары, с помощью которых в опыте снимаются рабочие термограммы и определяются параметры начального неустановившегося распределения температуры.

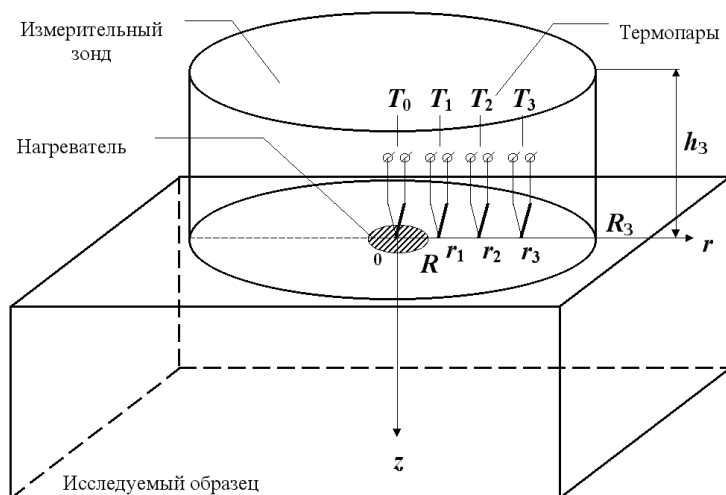


Рис. 1 Измерительная схема

При проведении оперативного многостадийного контроля комплексное определение теплопроводности λ и температуропроводности a производится на рабочих участках (заштрихованные области, рис. 2) термограмм стадий нагрева – индекс "н". Кроме того, термограммы, полученные на стадиях остывания – индекс "о" (рис. 2), дают дополнительную информацию о температуропроводности исследуемого образца [1, 2].

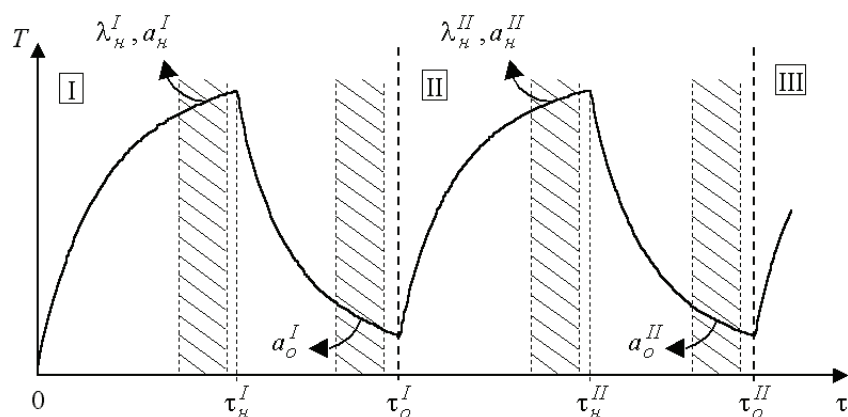


Рис. 2 Определение комплекса ТФС при многостадийном НК
(T - избыточная температура в центральной точке контроля)

Для получения расчетных зависимостей определения ТФС на стадии нагрева воспользуемся моделью теплового сферического полупространства. Известно [3], что при определенных условиях, а именно при значениях времени $\tau \gg 0$, процесс распространения тепла в массивном теле при нагреве его круглым плоским нагревателем (рис. 3, а) будет мало различаться с тепловым процессом, протекающим в этом же теле, но нагреваемом полусферической полостью, расположенной в той же, что и круглый нагреватель, центральной части его поверхности (рис. 3, б). Таким образом, двухмерная задача теплопроводности может быть сведена при определенных условиях к одномерной посредством замены реального плоского круглого нагревателя радиусом R с поверхностной плотностью теплового потока q полусферическим нагревателем с эквивалентными параметрами R_c и q_c (рис. 3). Это позволяет нам обеспечить условия НК и исключить необходимость внедрения термодатчиков вглубь исследуемого тела для определения начального температурного распределения и упростить расчетные соотношения.

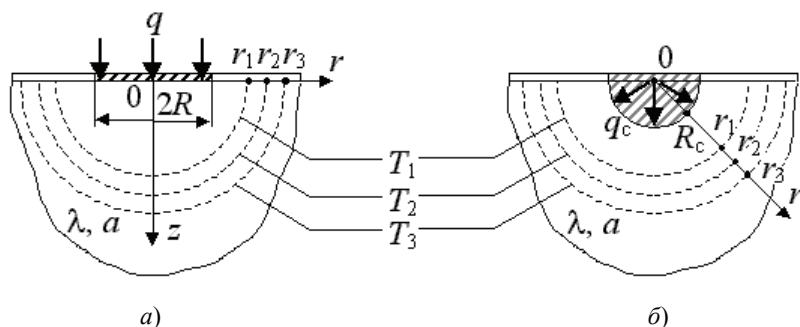


Рис. 3 Схема теплового воздействия поверхностными нагревателями: а - круглым; б - полусферическим

Математически задача теплопроводности для системы, изображенной на рис. 3, б, может быть записана в следующем виде [4, 5]:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (R_c \leq r < \infty, \quad \tau \geq 0); \quad (1)$$

начальное условие:

$$T(r, 0) = f(r); \quad (2)$$

граничные условия:

$$T(\infty, \tau) = 0; \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(R_c, \tau)}{\partial r} = q_c - c_n \frac{\partial T(R_c, \tau)}{\partial \tau}, \quad (4)$$

где T - температура, c_n - теплоемкость нагревателя.

Из решения краевой задачи (1)-(4) методом интегральных преобразований Лапласа получено выражение, описывающее изменение избыточной температуры в центральной точке контроля для рабочего (заштрихованного) участка термограммы (рис. 2) произвольной стадии нагрева [2]:

$$\tilde{T}(\tau_c) = b_0 - b_1 \tau_c, \quad (5)$$

где $\tilde{T}(\tau_c) = \tilde{T}(\tau) = T(\tau) - I(\tau)$, b_0 и b_1 - параметры рабочего участка термограммы $\tilde{T}(\tau_c)$, не зависящие от времени и определяемые по экспериментальным данным методом наименьших квадратов, $\tau_c = 1/\sqrt{\tau}$,

$$I(\tau) = \frac{1}{R_c \sqrt{\pi a \tau}} \int_{R_c}^{\infty} r f(r) \frac{(r - R_c) e^{-(r - R_c)^2 / (4a\tau)}}{(r - R_c) + \frac{2a\tau}{R_c}} dr - \quad (6)$$

интеграл начального распределения температуры $f(r)$, существующего в образце на момент времени τ_n начала рассматриваемой стадии нагрева (рис. 2) и описываемого следующей зависимостью

$$f(r) = A_n \exp \left[-\frac{(r - R_c)^2}{B_n} \right], \quad (7)$$

что подтверждено нашими теоретическими и экспериментальными исследованиями, проведенными на различных теплоизоляционных материалах. Определение в эксперименте параметров A_n и B_n производится в момент времени начала произвольной стадии нагрева (рис. 2) по показаниям датчиков температуры, размещенных в плоскости контакта $z = 0$ (рис. 1). Координаты расположения датчиков $r = 0, r_1, r_2, r_3$ (рис. 1) выбираются таким образом, чтобы обеспечить линеаризацию их показаний вдоль оси Or .

С учетом (7) выражение (6) примет вид

$$I(\tau) = A_n \sqrt{Fo_c / \pi} \times \left\{ 2 \cdot Fo_c / \Phi + (1 - 2 \cdot Fo_c) \times \right. \\ \left. \times \left[\sqrt{\pi / \Phi} - 2\sqrt{\pi} \cdot F(\sqrt{\Phi}) + e^{-\Phi} Ei^*(\Phi) \right] \right\}, \quad (8)$$

где $Fo_c = a\tau / R_c^2$ - число Фурье полусферического источника тепла,

$\Phi = Fo_c(Q_n Fo_c + 1)$, $Q_n = 4R_c^2 / B_n$, $Ei^*(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^t}{t} dt$ - интегральная показательная

функция, $F(x) = e^{-x^2} \int_0^x e^{t^2} dt$ - интеграл Досона [6].

Расчетные соотношения для определения комплекса ТФС имеют вид

$$\lambda = \frac{q_c R_c}{b_0}, \quad a = \frac{1}{\pi} \left(\frac{b_0}{b_1} R_c \right)^2, \quad (9)$$

где величины R_c и q_c являются постоянными измерительного устройства и находятся при градуировке измерительного зонда.

Из решения краевой задачи теплопроводности при остывании твердого тела [1] получена формула для определения температуропроводности на произвольной стадии остывания (рис. 2)

$$a = \frac{B_0}{4\tau} \left[\left(\frac{A_0}{T(\tau)} \right)^{2/3} - 1 \right], \quad (10)$$

где параметры A_0 и B_0 начального распределения для произвольной стадии остывания, которое имеет вид

$$f(r) = A_0 \exp \left(-r^2 / B_0 \right), \quad (11)$$

определяются аналогично соответствующим параметрам стадии нагрева. Здесь распределение $f(r)$ является результатом предшествующего нагрева (рис. 2), в ходе которого в исследуемом образце формируется сферическое температурное поле (рис. 3).

Для реализации разработанного многостадийного метода НК ТФС создана информационно-измерительная система (ИИС) [7, 8], которая состоит из измерительно-вычислительного устройства (ИВУ), персональной ЭВМ (ПЭВМ) и периферийных устройств, объединенных между собой системным программно-аппаратным интерфейсом (рис. 4).

ИВУ реализовано на базе микропроцессорного устройства Zila-1000, ядром которого является 16-ти битный микроконтроллер P80CL580 с тактовой частотой 11 МГц фирмы "Texas Instruments" [9]. В состав Zila-1000 входят: оперативное и постоянное запоминающие устройства, 12-ти битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на 16 каналов, жидкокристаллический индикатор, клавишная клавиатура, блок управления нагревом, последовательный интерфейс RS232 для связи с ПЭВМ, параллельный интерфейс Centronics и пр. Питание устройства осуществляется от сети 220 В.

Предусматривается функционирование ИИС как в лабораторных, так и производственных (без использования ПЭВМ) условиях. Во втором случае для расчета интеграла $I(\tau)$ начального распределения температуры (8) найдено компактное выражение, достаточно просто реализуемое в ИВУ

$$I(\tau) = A_n \sqrt{\frac{Fo_c}{\pi}} \times [2 Fo_c \Phi^{-1} + (1 - 2 Fo_c) \alpha \Phi^\gamma], \quad (12)$$

где α и γ - постоянные коэффициенты, определяемые в зависимости от диапазона величины Φ .



Рис. 4 Информационно-измерительная система НК ТФС

Алгоритмическое обеспечение ИИС позволяет осуществлять управление процессом НК, заключающееся в автоматическом определении временных границ рабочих участков термограмм чередующихся стадий нагрева и остывания (рис. 2), а также нахождении минимально необходимого (для обеспечения заданной точности) числа последовательных стадий одного многостадийного эксперимента.

Теоретическая оценка среднеквадратической относительной погрешности определения комплекса ТФС на отдельных стадиях НК показала, что ее величина составляет: для теплопроводности - $\delta_\lambda \leq 5,9 \%$, для температуропроводности - $\delta_a \leq 7,2 \%$ (первая стадия нагрева, рис. 2); $\delta_\lambda \leq 6,7 \%$ и $\delta_a \leq 11,5 \%$ (вторая стадия нагрева при функционировании ИИС в условиях производства); $\delta_a \leq 6,3 \%$ (стадия остывания). Рассчитанные значения погрешностей соответствуют предельному случаю, характеризующемуся максимальной ошибкой измерения. С увеличением числа проведенных стадий эксперимента будет уточняться величина температуропроводности, а следовательно, снижаться относительная погрешность δ_a и повышаться точность определения как теплопроводности λ исследуемого образца, так и его температуропроводности a . Использование итерационного алгоритма определения ТФС при функционировании ИИС в лабораторных условиях позволяет практически полностью исключить увеличение относительной погрешности, начиная со второй стадии нагрева, по сравнению с первым этапом контроля.

Результаты экспериментальной проверки многостадийного метода НК ТФС, выполненной на эталонных материалах с помощью созданной ИИС по алгоритму для лабораторных условий, приведены в таблице.

Таблица

Материал	Экспериментальные данные		Число измерений n	Справочные и паспортные данные	
	λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^7$, м ² /с		λ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^7$, м ² /с
Макролон	0,208	1,31	16	0,20	1,28
Рипор	0,027	4,73	17	0,028	4,61
ПММ	0,196	1,13	12	0,195	1,08
Стеклопластик	0,405	1,71	14	0,418	1,78
Стекло	0,710	4,21	21	0,74	4,42
Гетинакс	0,243	3,52	18	0,252	3,41
Полистирол	0,040	2,77	18	0,038	2,84

Описанная выше ИИС многостадийного НК ТФС, как показала экспериментальная проверка, обеспечивает качество контроля за счет оперативного проведения многократных однотипных измерений на одном и том же участке поверхности исследуемого образца. При этом исключение необходимости термостатирования позволяет сократить продолжительность процесса контроля в среднем в 4 ... 7 раз, а также повысить достоверность получаемых результатов за счет независимого определения температуропроводности на пассивной стадии остывания, которая обычно в методах теплофизического НК рассматривается лишь в качестве подготовительной.

Список литературы

1. Сенкевич А. Ю. Учет начального распределения температуры образца в методах неразрушающего теплофизического контроля // Труды ТГТУ: Сборник научных статей молодых ученых и студентов. Вып. 5. - Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. - С. 45 - 49.
2. Чуриков А. А., Сенкевич А. Ю. Начальное распределение температуры в образце при многостадийном неразрушающем теплофизическом контроле //

V научная конференция. Краткие тезисы докладов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. - С. 96.

3. Теплофизические измерения и приборы / Е. С. Платунов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин, Г. С. Петров; Под общ. ред. Е. С. Платунова. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние. – 1986. - 256 с.

4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. - М.: Наука, 1964. - 487 с.

5. Лыков А. В. Теория теплопроводности. - М.: Высш. шк., 1967. - 599 с.

6. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. - М.: Наука, 1979. - 832 с.

7. Чуриков А. А., Сенкевич А. Ю. Информационно-измерительная система многостадийного неразрушающего контроля теплофизических свойств // Датчики и системы. – 2000. - № 9. - С. 26 - 29.

8. Чуриков А. А., Сенкевич А. Ю., Муромцев Д. Ю. Информационно-измерительная система многостадийного неразрушающего контроля теплофизических свойств "Термоанализатор" // Информационные технологии в проектировании микропроцессорных систем. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. – Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-т, 2000. - С. 106-108.

9. Meßrechner ZILA-1000, ZILA Elektronik GmbH. - Zella-Mehlis, Germany, 1996.

Multi-stage Method and Information Measurement System of Non-destructive Control of Thermophysical Properties

A.A. Churikov, A.Yu. Senkevich

Department «Automated Systems and Devices», TSTU

Key words and phrases: measurement probe; information measurement system; non-destructive control; thermophysical properties.

Abstract: Method and employing it information measurement system of multi-stage non-destructive control of thermophysical properties of solid heat insulating materials, providing reliability and accuracy of obtained data through multiple identified sequential measurements are described. Theoretical evaluation of method error, results of experimental test of developed system and optimum conditions search and a number of measurements during a single experiment are given.

Vielstadiummethode und Informationsmeßsystem der ununterbrochenen Kontrolle der wärme-physikalischen Eigenschaften

Zusammenfassung: Es werden die Methode und sie realisierendes Informationsmeßsystem der vielstadien ununterbrochenen Kontrolle der wärme-physikalischen Eigenschaften von harten wärmeisolierenden Stoffen beschreibt. Sie gewährleisten die Sicherheit und Genauigkeit der bekommenen Ergebnisse auf Rechnung der operativen Durchführung von vielmaligen identischen aufeinanderfolgenden Messungen. Es werden die theoretische Schätzung des Methodenfehlers, die Ergebnisse der Experimentalkontrolle des erarbeiteten Systems und des Suchens der Optimalbedingungen und der Anzahl der durchführenden Messungen im Laufe eines Versuchs angeführt.

**Méthode à multiples stades et système informationnel de mesure
du contrôle non destructif des propriétés thermophysiques**

Résumé: On a décrit la méthode et le système informationnel de mesure qui le réalise pour le contrôle non destructif à multiples stades des propriétés thermophysiques des matériaux solides assurant la fiabilité et la précision des résultats obtenus compte tenu de multiples mesures identiques séquentielles. On cite l'évaluation de l'erreur de la méthode, les résultats de la vérification expérimentale du système élaboré et de la recherche des conditions optimales et de la quantité des mesures effectuées au cours de l'expérience.
