

МНОГОМОДЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

**А.О. Антонов, Н.Ю. Полунина, О.Н. Попов,
Е.В. Пудовкина, И.В. Рогов, Н.Ф. Майникова**

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический
университет», г. Тамбов*

Рецензент д-р техн. наук, профессор Н.П. Жуков

Ключевые слова и фразы: измерительная система; математическое моделирование; многомодельный подход; термограммы; теплофизические свойства.

Аннотация: Представлены описания методов и измерительных систем, предназначенных для определения теплофизических свойств твердых материалов. Применение многомодельного подхода позволяет определять комплекс теплофизических свойств с повышенной точностью.

Создание новых и совершенствование известных методов и средств для определения теплофизических свойств (ТФС) материалов востребованы и являются актуальными в связи со сложностью и большим объемом экспериментальных исследований по определению качества как традиционных, так и вновь синтезированных материалов.

Согласно принципу моделируемости теории систем, включающему постулат многообразия моделей, сложная система может быть представлена конечным множеством моделей, различающихся используемыми математическими зависимостями и физическими закономерностями. Основные положения многомодельного подхода к аналитическому описанию теплопереноса изложены в работе [1].

В данной работе представлены описания двух многомодельных методов, реализующих обычный (разрушающий) метод, позволяющий измерять ТФС материалов только после изготовления образцов заданной формы и размеров, и неразрушающий метод – без нарушения целостности изделий.

Антонов Антон Олегович – аспирант кафедры «Гидравлика и теплотехника»; Полунина Наталия Юрьевна – аспирант кафедры «Гидравлика и теплотехника»; Попов Олег Николаевич – аспирант кафедры «Гидравлика и теплотехника»; Пудовкина Екатерина Владимировна – аспирант кафедры «Гидравлика и теплотехника»; Рогов Иван Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и теплотехника»; Майникова Нина Филипповна – доктор технических наук, профессор кафедры «Гидравлика и теплотехника», e-mail: teplotehnika@nnt.tstu.ru, ТамбГТУ, г. Тамбов.

Так, среди приборов массового применения для определения теплопроводности λ широко используют симметричный бикалориметр, реализующий метод регулярного режима. Прибор предназначен для определения теплопроводности теплоизоляционных материалов с $\lambda = 0,03 \dots 0,5$ Вт/(м·К) на образцах в виде диска диаметром от 120 до 160 мм, толщиной от 6 до 20 мм. Недостатки прибора: возможность определения только теплопроводности (необходимо знать теплоемкость испытуемого образца); теплопроводность материала определяют только на стадии остывания; большие погрешности измерений, связанные с тем, что измерительную информацию фиксируют и обрабатывают вручную.

С целью устранения указанных недостатков и расширения возможностей данного прибора в Тамбовском государственном техническом университете разработана измерительная система (ИС), реализующая многомодельный метод определения ТФС материалов. Состав ИС: теплоизмерительная ячейка ТИЯ на базе бикалориметра и блоки измерительно-управляющей подсистемы (рис. 1).

Управление режимными параметрами и регистрация измерительной информации осуществляются с помощью персонального компьютера ПК, оснащенного многофункциональной платой сбора данных ПСД марки РС1-1202Н. Внутри латунного сердечника С расположен нагреватель, с обеих сторон от которого располагаются образцы Об испытуемого материала. Напряжение на нагреватель ячейки ТИЯ подается от блока питания БП, управление которым осуществляется при помощи модуля дискретного ввода/вывода МД платы ПСД через реле а блока БР. Мощность электрического нагревателя ТИЯ контролируется ваттметром В. Сигналы с термомпар, расположенных в ТИЯ и жидкостном термостате ЖТ, поступают через мультиплексор П, усилитель У, аналогово-цифровой преобразователь АЦП, буфер обмена Б и интерфейс И в ПК.

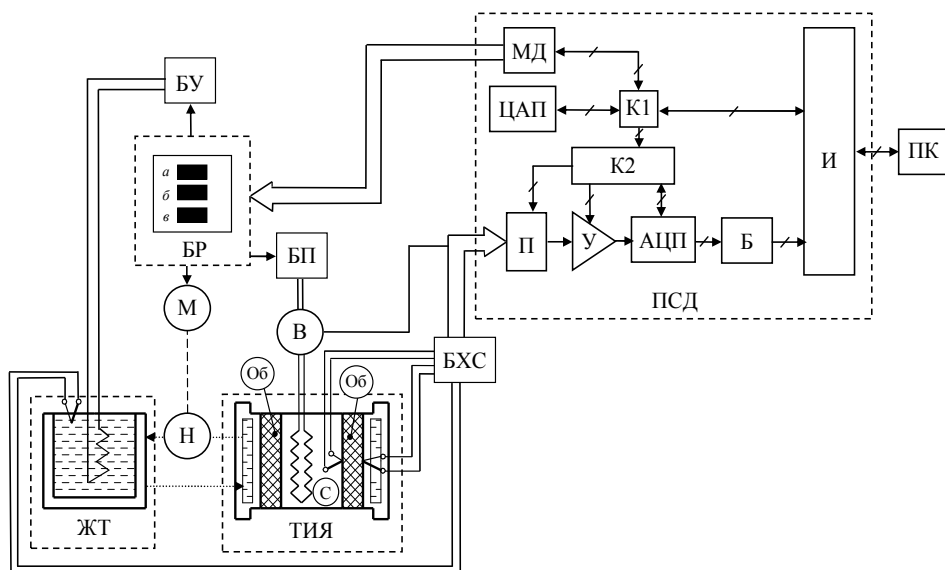


Рис. 1. Структурная схема ИС

Свободные концы термопар ТИЯ образуют дифференциальную термопару с помощью блока холодных спаев БХС. Термостат ЖТ и насос Н используются для реализации требуемого температурного режима и поддержания граничных условий первого рода в ТИЯ. Управление электродвигателем М привода насоса Н осуществляется через контакты реле б. Напряжение на электрический нагреватель ЖТ подается от блока управления БУ. Обеспечение заданного температурного режима в ТИЯ осуществляется реле в. Реле

а, б, в, входящие в состав БР, программно управляются через интерфейс И, контроллер К1, модуль дискретного ввода/вывода МД ПК. Контроллер К2 обеспечивает необходимый порядок опроса каналов и различные диапазоны измерения на каждом из них. Сбор измерительной информации производится при нагреве и остывании исследуемых образцов.

Теоретическую основу многомодельного метода определения ТФС материалов, реализуемого ИС, составляют аналитические закономерности распространения тепла в системе двух тел на трех стадиях: при нагреве, на стационарной стадии и при остывании. В ходе эксперимента фиксируется термограмма – зависимость разности значений температуры на внутренней и наружной стенках исследуемого образца от времени $\Delta T = f(\tau)$.

На экспериментальной термограмме (рис. 2) можно выделить рабочие участки, на которых наблюдается хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений температуры (II, IV, VII) и участки переходные, для которых построение точных аналитических моделей вызывает большие теоретические трудности (I, III, V, VI, VII).

На основании решений краевых задач теплопроводности [2] получены расчетные выражения, описывающие термограмму на рабочих участках;

– для стадии нагрева (II участок)

$$\Delta T_{\text{н}} = \frac{qh}{\lambda} - 2 \frac{qh}{\lambda} \frac{(1+3\sigma)^2}{3(1+4\sigma+6\sigma^2)} \exp\left(-\frac{3}{1+3\sigma} \frac{a\tau}{h^2}\right); \quad (1)$$

– для стационарной стадии (IV участок)

$$\Delta T_{\text{ст}} = \frac{qh}{\lambda}; \quad (2)$$

– для стадии остывания (VII участок)

$$\Delta T_{\text{ост}} = 2 \frac{qh}{\lambda} \frac{(1+3\sigma)^2}{3(1+4\sigma+6\sigma^2)} \exp\left(-\frac{3}{1+3\sigma} \frac{a\tau}{h^2}\right), \quad (3)$$

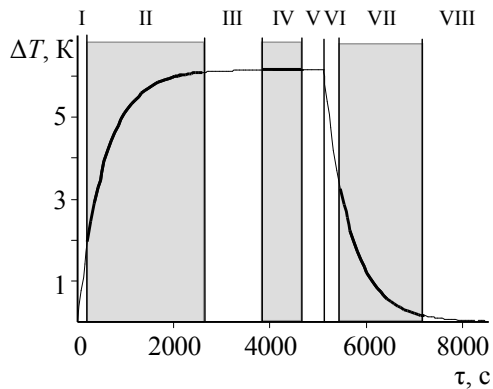


Рис. 2. Зависимость $\Delta T = f(\tau)$ для стадий нагрева, стационарной, остывания.

Материал: полиметилметакрилат (ПММА).

Участки: I, III, V, VI, VIII – переходные;

II, IV, VII – рабочие

где $q = Q/2F$ – удельный тепловой поток, Вт/м², Q – мощность нагревателя, Вт, F – площадь поверхности сердечника, м²; $\sigma = c_1\rho_1h_1/2c\rho h$ – относительная теплоемкость материала сердечника; λ , c , ρ , a – теплопроводность, Вт/(м·К), удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), плотность, кг/м³, температуропроводность, м²/с, образца соответственно; c_1 , ρ_1 – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), и плотность, кг/м³, материала сердечника соответственно; h , h_1 – значения толщины образца и сердечника; m ; τ – время, с.

Представим выражения (1) и (3) в виде:

$$\Delta T_n(\tau) = \Delta T_{ст} - b_0 \exp(b_1\tau); \quad (4)$$

$$\Delta T_{ост}(\tau) = b_0 \exp(b_1\tau), \quad (5)$$

где $b_0 = 2 \frac{qh}{\lambda} \frac{(1+3\sigma)^2}{3(1+4\sigma+6\sigma^2)}$, $b_1 = -\frac{3}{1+3\sigma} \frac{a}{h^2}$ – параметры моделей, описывающих термограмму на рабочих участках.

Расчетные выражения для определения комплекса ТФС на стадиях нагрева и остывания имеют вид:

$$c\rho = -\frac{2b_0b_1c_{п} + q + \sqrt{-2b_0^2b_1^2c_{п}^2 - 2b_0b_1c_{п}q + q^2}}{b_0b_1h}; \quad (6)$$

$$\lambda = -\frac{b_1h(c\rho + 3c_{п})}{3}; \quad (7)$$

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}. \quad (8)$$

На стационарной стадии в соответствии с законом Фурье определяется теплопроводность испытуемого материала

$$\lambda = \frac{qh}{\Delta T_{ст}}. \quad (9)$$

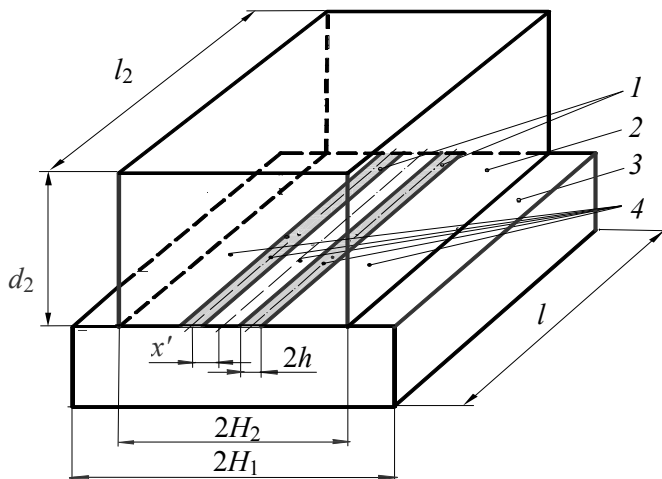


Рис. 3. Измерительная схема:

1 – линейные нагреватели; 2 – подложка измерительного зонда;
3 – исследуемое тело; 4 – термопреобразователи

Таким образом, появляется возможность за одну реализацию эксперимента определить комплекс ТФС.

Второй многомодельный метод и реализующая его ИС предназначены для неразрушающего контроля ТФС. Согласно измерительной схеме системы «изделие – зонд» (рис. 3), тепловое воздействие на исследуемое полимерное тело 3, имеющее равномерное начальное температурное распределение, осуществляется с помощью двух линейных нагревателей 1 постоянной мощности, встроенных в подложку измерительного зонда 2.

Термопреобразователями 4 (ТП1 – ТП5) в ходе эксперимента фиксируются термограммы – зависимости избыточной температуры T_i от времени (рис. 4). Определение ТФС осуществляется по рабочим участкам термограмм на основании статистических критериев по математическим моделям, полученным при решении соответствующих краевых задач нестационарной теплопроводности при распространении тепла от одного линейного источника тепла постоянной мощности в цилиндрическом полупространстве и двух линейных источников тепла [3].

Применение многомодельного подхода к определению ТФС позволяет повысить точность методов по следующим причинам. Определение рабочих участков термограмм на основании статистических критериев позволяет исключить влияние субъективного фактора при обработке термограмм; так как в разработанных методах используются не отдельные точки термограммы, а участки, то уменьшается случайная составляющая погрешности определения ТФС исследуемого материала. В случае исследования ТФС дисперсных материалов, согласно предлагаемым методам, определяются их среднеинтегральные значения. За счет использования нескольких участков нескольких термограмм возможно осуществление самоконтроля при работе ИС. Разработанные авторами методы определения ТФС позволяют исследовать полимеры и композиционные материалы на их основе при наличии тепловых эффектов, сопровождающих структурные превращения (например, твердофазные, релаксационные). Учет возможных структурных превращений в полимерных материалах, влияющих на результат определения ТФС, позволяет также повысить точность методов.

Таким образом, применение многомодельного подхода к разработке методов и средств для определения ТФС твердых материалов перспективно с точки зрения повышения точности, достоверности и воспроизводимости получаемых результатов.

Список литературы

1. Жуков, Н.П. Многомодельный метод неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Н.П. Жуков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 2. – С. 42–46.

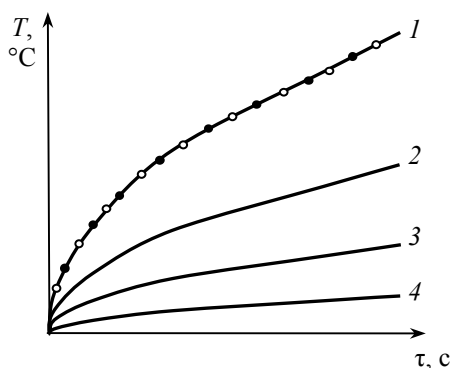


Рис. 4. Термограммы, зафиксированные термопреобразователями:
1 – ТП2, ТП4; 2 – ТП3;
3 – ТП1; 4 – ТП5

2. Измерительная система на базе бикалориметра, реализующая много-модельный метод определения теплофизических свойств / И.В. Рогов [и др.] // Завод. лаб. Диагностика материалов. – 2011. – Т. 77, № 8. – С. 36–39.

3. Многомодельные методы в микропроцессорных системах неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / С.В. Мищенко [и др.]. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2012. – 112 с.

Multimodel Methods and Means for Determining Thermal Physical Properties of Materials

**A.O. Antonov, N.Yu. Polunina, O.N. Popov,
E.V. Pudovkina, I.V. Rogov, N.F. Maynikova**

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: mathematical modeling; measuring system; multi-model approach; thermal physical properties; thermogram.

Abstract: The paper designs a description of the methods and measurement systems for determining thermal physical properties of solid materials. The use of multi-model approach enables to define a set of thermal physical properties with higher precision.

© А.О. Антонов, Н.Ю. Полунина, О.Н. Попов,
Е.В. Пудовкина, И.В. Рогов, Н.Ф. Майникова, 2012