

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Е.Н. Ковалев, А.Г. Дивин, С.В. Пономарев, А.А. Чуриков

Кафедра «Автоматизированные системы и приборы», ГОУ ВПО «ТГТУ»

Ключевые слова и фразы: измерительная система; плата сбора данных; температуропроводность; теплоемкость; теплоизоляционные материалы; теплопроводность; теплофизические характеристики; технологии LabView; элемент Пельтье.

Аннотация: Предложены физическая и математическая модели измерительного устройства и автоматизированная измерительная система для реализации комплекса методов измерения теплофизических характеристик твердых, сыпучих и жидких материалов.

Обозначения и аббревиатуры

α – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;	q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
L_1 – координата границы между средним слоем и исследуемым веществом, м;	$T(x, \tau)$ – температурное поле внутри измерительного устройства, $^\circ\text{C}$;
L_2 – координата размещения электронагревателя между верхним и средним слоями, м;	x – пространственная координата одномерного температурного поля, м;
L_{23} – координата размещения термоэлектрического преобразователя, м;	λ – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$;
L_3 – координата внешней границы верхнего слоя, м;	τ – время, с;
P – удельная мощность нагревателя, $\text{Вт}/\text{м}^2$	БУСТ – блок управления семисторами и тиристорами;
	ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь.

В ходе производства теплоизоляционных материалов, при математическом моделировании и оптимизации процессов теплообмена в энергетике, химической промышленности возникают потребности в определении теплофизических характеристик.

Для удовлетворения этих потребностей в настоящее время на кафедре «Автоматизированные системы и приборы» Тамбовского государственного технического университета разработана информационно-измерительная система для реализации комплекса методов измерения теплофизических характеристик. Особенностью системы является возможность гибкого программного перехода к выбору методов и режимов проведения эксперимента по измерению теплофизических свойств.

Анализ рынка измерительных услуг в области теплофизики позволил сформулировать следующие требования к измерительной системе:

- возможность определения комплекса теплофизических величин в одном эксперименте;
- погрешность измерения теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности не более 7 %;

- наличие аттестованной методики выполнения измерений и аттестация измерительной системы в целом;
- автоматизация процессов сбора измерительной информации, управления ходом эксперимента, обработки экспериментальных данных;
- возможность определения теплофизических свойств как твердых, так жидких и сыпучих материалов.

В результате проведенного литературного обзора не были выявлены средства измерения, полностью соответствующие приведенным требованиям, поэтому разработка измерительной системы представляется актуальной. В основе системы лежит измерительное устройство, физическая модель которого представлена на рис. 1.

Измерительное устройство представляет собой слоистую систему плоских образцов – 1, 2 и 3, из которых слои 2 и 3, выполненные из капролона, имеют известные теплофизические свойства, а слой 1 – исследуемый образец. Между слоями 2 и 3 расположен плоский нагреватель 4. Температуры $T(0, \tau)$ и $T(L_3, \tau)$ внешних поверхностей образцов 1 и 3 измеряются кабельными термоэлектрическими преобразователями (термопарами) 5 типа КТХК 02.01-С₁₀-И-1-80/2000 и поддерживаются в соответствии с заданным законом при помощи элементов Пельтье, которые работают в режиме нагрева–охлаждения. Для улучшения процессов теплообмена на поверхности этих элементов используются блоки вентиляторов и радиаторы. Дополнительно измеряется температура $T(L_{23}, \tau)$ в слое 3 при помощи термопары (также типа КТХК 02.01-С₁₀-И-1-80/2000), рабочий спай которой размещен в точке с координатой L_{23} .

Процесс переноса тепла в системе контактирующих тел описывается математической моделью в виде системы трех дифференциальных уравнений [1]:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad L_2 < x < L_3, \quad \tau > 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad L_1 < x < L_2, \quad \tau > 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a_u \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad 0 < x < L_1, \quad \tau > 0, \quad (3)$$

дополненной начальными условиями

$$T(x, 0) = 0, \quad 0 \leq x \leq L_3, \quad (4)$$

и граничными условиями

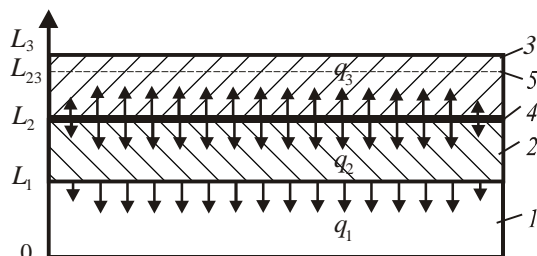


Рис. 1. Физическая модель измерительного устройства

$$-\beta_1 \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} + \gamma_1 T(0, \tau) = \varphi_{1i}(\tau), \quad (5)$$

$$T(L_1 + 0, \tau) = T(L_1 - 0, \tau), \quad (6)$$

$$\lambda_2 \frac{dT(L_1 + 0, \tau)}{dx} = \lambda_{и} \frac{dT(L_1 - 0, \tau)}{dx}, \quad (7)$$

$$T(L_2 + 0, \tau) = T(L_2 - 0, \tau), \quad (8)$$

$$\lambda_1 \frac{dT(L_2 + 0, \tau)}{dx} - \lambda_2 \frac{dT(L_2 - 0, \tau)}{dx} = P(\tau), \quad (9)$$

$$\beta_3 \frac{\partial T(L_3, \tau)}{\partial x} + \gamma_3 T(L_3, \tau) = \varphi_{3i}(\tau). \quad (10)$$

При использовании измерительного устройства для реализации регулярного режима первого рода, граничные условия (5) и (10) примут вид:

$$i = 1, \quad \beta_1 = \beta_3 = 0, \quad \gamma_1 = \gamma_3 = 1,$$

$$T(0, \tau) = \varphi_{11}(\tau) = \text{const}, \quad T(L_3, \tau) = \varphi_{31}(\tau) = \text{const}.$$

При осуществлении регулярного режима второго рода:

$$i = 2, \quad \beta_1 = \lambda_{и}, \quad \beta_3 = \lambda_3, \quad \gamma_1 = \gamma_3 = 0,$$

$$-\lambda_{и} \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = \varphi_{12}(\tau) = q_1(\tau), \quad \lambda_3 \frac{\partial T(L_3, \tau)}{\partial x} = \varphi_{32}(\tau) = q_3(\tau).$$

При осуществлении регулярного режима третьего рода:

$$i = 3, \quad \beta_1 = \beta_3 = 0, \quad \gamma_1 = \gamma_3 = 1,$$

$$T(0, \tau) = A \cos(\omega \tau), \quad T(L_3, \tau) = A \cos(\omega \tau).$$

Если прямую краевую задачу (1) – (10) дополнить условием

$$T(L_{23}, \tau) = T_{э\kappa}(\tau), \quad (11)$$

то, решая полученную обратную краевую задачу (1) – (11) методами, рассмотренными в [1, 2], можно получить расчетные соотношения для вычисления искомых теплофизических величин $a_{и}$, $\lambda_{и}$ исследуемых образцов.

Для реализации представленной модели была разработана конструкция измерительного устройства (рис. 2).

Корпус устройства для измерения теплофизических свойств материала представляет собой емкость 7 с крышкой 8. В корпусе находятся плоский исследуемый образец 1 толщиной L_1 , образцы 2, 3 с известными свойствами, электронагреватель 4, выполненный в виде спирали Архимеда, намотанной между образцами 2 и 3, термоэлектрические преобразователи 5, защитная пластина 6.

Для регулирования температуры на поверхности эталонных образцов используются элементы Пельтье 9. Они представляют собой пластины толщиной 0,5...1 мм. Служат элементы для переноса тепла с одной поверхности пластины на другую. Эффект Пельтье возникает, когда электрический ток проходит по

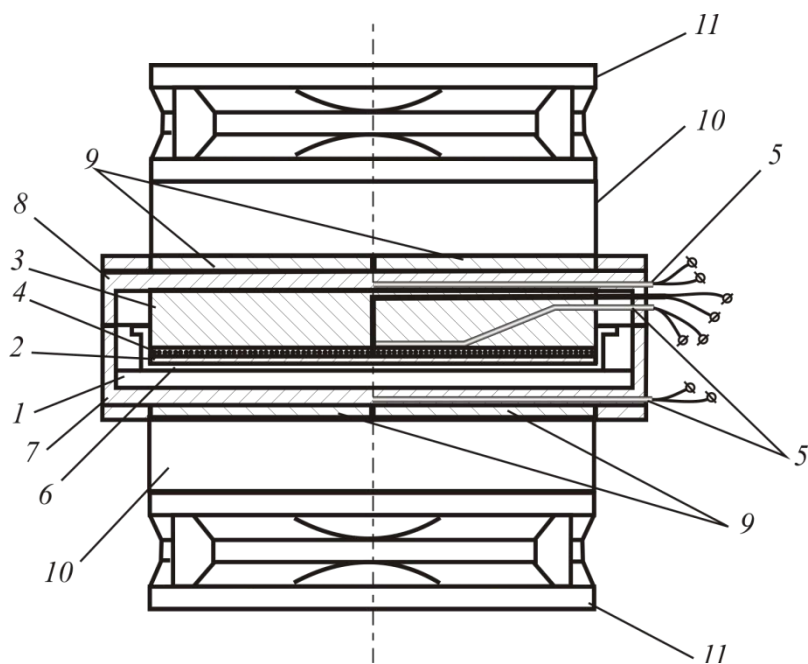


Рис. 2. Конструкция измерительного устройства

двум проводникам из двух различных проводящих материалов, соединенным в двух точках. При этом одна точка разогревается, а температура другой падает, благодаря переносу тепла под действием электрического тока.

На горячей поверхности выделяется значительная тепловая энергия, равная сумме энергий, перенесенной с охлаждающейся поверхности, и энергии, выделившейся при протекании тока через элемент. Для отведения этого тепла используются радиаторы *10* и охлаждающие вентиляторы *11*.

Особенностью измерительного устройства является применение элементов Пельтье в двух режимах: измерения тепловых потоков и задания тепловых воздействий. Переход из одного режима в другой осуществляется по программе, разработанной в LabView. Теплофизический эксперимент заключается в регистрации температурного отклика на тепловые воздействия от нагревателя и элементов Пельтье. Параметры этого отклика зависят от теплофизических характеристик исследуемого материала. При помощи технологий LabView можно легко и быстро обеспечить различные виды тепловых воздействий (импульсные, постоянной мощности, гармонические и др.), и как следствие, использовать различные стадии теплового процесса – регулярную первого, второго и третьего рода или стационарную.

При реализации регулярного режима первого рода элементы Пельтье выполняют функцию термостатов и с их помощью поддерживают граничные условия первого рода.

В случае использования регулярного режима второго рода элементы Пельтье работают как датчики тепловых потоков, и эти потоки в ходе эксперимента поддерживаются постоянными. При этом, как правило, определяется зависимость теплофизических характеристик от температуры.

Регулярный режим третьего рода заключается в создании при помощи тех же элементов Пельтье температурных волн в слое материала. По степени их затухания и сдвигу фаз определяют теплофизические характеристики.

Для обработки сигналов и регулирования температуры измерительное устройство включается в состав измерительной установки. В состав установки также входят преобразователи термоэлектрические (3 шт.), БУСТы (2 шт.), персональный компьютер с платой сбора данных.

Две термопары преобразуют температуру на границах измерительного устройства в электрический сигнал, сигнал через плату сбора данных поступает в компьютер. На основе этих данных программа в соответствии с выбранным законом регулирования вычисляет значение управляющего сигнала, который через ЦАП поступает на БУСТ. БУСТ в соответствии с управляющим сигналом через тиристоры изменяет силу тока, подаваемого на элементы Пельтье. Таким образом, получаются два независимых контура, которые позволяют осуществлять стабилизацию температуры или программное управление изменением температуры на границах измерительного устройства, что необходимо для успешного проведения эксперимента.

Третья термопара находится внутри образца 3, выполненного из капролона, входящего в состав измерительного устройства. После включения нагревателя компьютер начинает регистрировать изменение температуры внутри образца 3 во времени, используя при этом сигнал термопары. Теплофизические характеристики данного образца являются известными величинами. Используя эти данные, вычисляют теплопроводность, температуропроводность и теплоемкость исследуемого материала.

Измерительная система была представлена в ходе конкурса «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (УМНИК-07-8), проведенного в рамках Шестой Международной теплофизической школы на тему «Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством» (МТФШ-6). По итогам конкурса было рекомендовано Фонду содействия развитию малых предприятий принять к финансированию создание данной системы.

Список литературы

1. Пономарев, С.В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография. В 2 кн. Кн. 1 / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, А.Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 204 с.

2. Пономарев, С.В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография. В 2 кн. Кн. 2 / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, А.Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 216 с.

Designing of Device for Implementation of Set of Measuring Techniques of Thermo-Physical Properties

E.N. Kovalev, A.G. Divin, S.V. Ponomarev, A.A. Churikov

Department "Automated Systems and Devices", TSTU

Key words and phrases: data acquisition board; heat capacity; heat conductivity; LabView technologies; measuring system; Peltier element; thermal diffusivity; thermo-physical characteristics.

Abstract: The paper presents physical and mathematical models of measuring device and automated measuring system for implementation of the set of measuring techniques of thermo-physical properties of solid, granular and liquid materials.

Erarbeitung der Einrichtung für die Realisierung des Komplexes der Methoden der Messung der wärme-physikalischen Charakteristiken

Zusammenfassung: Es sind physikalische und matematische Modelle der Messeinrichtung und das automatisierte Messsystem für die Realisierung des Komplexes der Methoden der Messung der wärme-physikalischen Charakteristiken der festen, streubaren und flüssigen Stoffe angeboten.

Elaboration du dispositif pour la réalisation du complexe des mesures des caractéristiques thermophysiques

Résumé: Sont proposés les modèles physique et mathématique du dispositif de mesure et le système de mesure automatisé pour la réalisation du complexe des méthodes de mesures des caractéristiques thermophysiques des matériaux solides, poreux et liquides.
