

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА В СИСТЕМЕ КОНТАКТИРУЮЩИХ ТЕЛ*

А. Г. Филатова, А. А. Чуриков, А. Г. Дивин

*Кафедра «Управление качеством и сертификация»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; kafedra@uks.tstu.ru*

Ключевые слова: дисперсные материалы; пористость; температуропроводность; теплоемкость; теплопроводность; теплофизика.

Аннотация: Дисперсные материалы являются основным сырьем для производства композитов и нанокompозитов, которые получили широкое распространение. Теплофизические свойства дисперсных материалов сильно зависят от пористости, плотности и температуры. Рассмотрены физическая и математическая модели измерительного устройства для определения теплоемкости, теплопроводности, температуропроводности, а также пористости, которые необходимо учитывать при изготовлении изделий из дисперсных материалов.

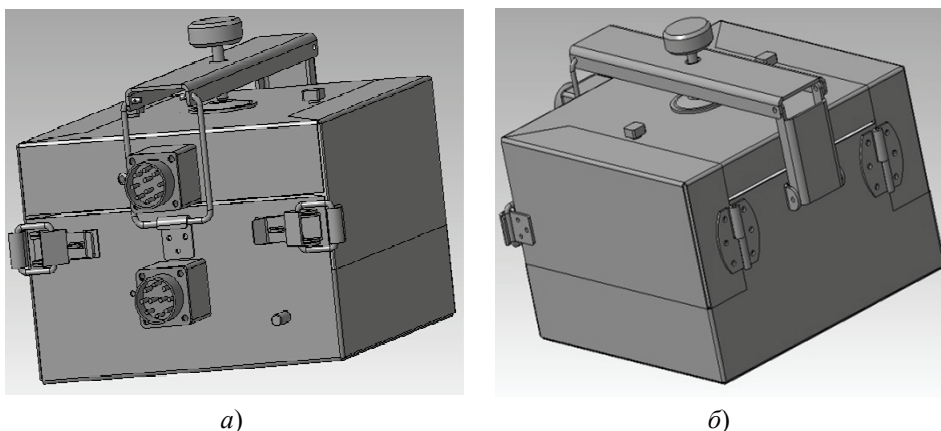
Интенсивное развитие важнейших отраслей науки и техники потребовало создания большого количества новых конструкционных, тепло- и электроизоляционных материалов, обладающих более высокими, а иногда новыми свойствами и эксплуатационными характеристиками [1]. Одним из способов получения таких материалов является модифицирование существующих полимеров углеродными нанотрубками и другими наноматериалами в целях создания нанокompозитов. Производство композитов и нанокompозитов в настоящее время получило широкое распространение. В большинстве своем эти вещества и исходное сырье для их изготовления представляют собой материалы дисперсной структуры. Теплофизические характеристики (ТФХ) дисперсных материалов очень сильно зависят от пористости, плотности и температуры, что необходимо учитывать при измерении их теплоемкости, теплопроводности и коэффициента температуропроводности и соответствующей пористости [2].

Особое место среди методов исследования ТФХ образцов и изделий из дисперсных материалов занимают неразрушающие методы контроля, характеризующиеся коротким периодом времени проводимых измерений, воздействием малым тепловым импульсом на исследуемый материал и низкой трудоемкостью проводимого исследования.

Таким образом, важной задачей является разработка и внедрение нового эффективного теплового метода и измерительного устройства, благодаря которому определяется комплекс ТФХ плоских образцов (достаточно малых размеров) как твердых, так и сыпучих дисперсных материалов. При этом из-за требований технологии и безопасности испытаний не рекомендуется располагать датчики и нагреватели внутри исследуемого образца.

В основе разрабатываемой измерительной системы применен прибор промышленного типа: измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 «100» (рис. 1), разработанный СКБ «Стройприбор», г. Челябинск [3].

* По материалам доклада на конференции ММТТ-27 (см. Вестник ТГТУ, т. 20, № 4).



а)

б)

Рис. 1. 3D-модель измерительной ячейки:

а – вид спереди; б – вид сзади

Прибор предназначен для измерения теплопроводности λ и теплового сопротивления R различных строительных материалов. Этот измеритель позволяет найти ТФХ плоских образцов размером $100 \times 100 \text{ мм}^2$, толщиной $3 \dots 28 \text{ мм}$. Диапазон измерения теплопроводности: $0,02 \dots 1,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; диапазон измерения температуры: от 0 до $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Однако в основе измерения теплопроводности лежит стационарный метод измерения, что для определения комплекса ТФХ использовать невозможно, тем более, что одна из целей создания новой измерительной системы – возможность измерения зависимости ТФХ от пористости исследуемого дисперсного материала. Поэтому, применяя существующую измерительную систему, ее измерительный блок, систему обработки измерительной информации, систему автоматического управления ходом эксперимента с применением элементов компьютерной техники, а также возможность подключения к управляющему компьютеру, нами разработан нестационарный метод определения комплекса ТФХ (теплопроводность, эффективная теплоемкость, температуропроводность).

Для наглядности и удобства описания математической модели теплового процесса реальное устройство заменено физической моделью трехслойной тепловой системы (рис. 2), где U – относительная температура, равная разнице температур окружающей среды и объекта контроля; U_x – температура холодильника; U_n – температура нагревателя в измерителе ИТП-МГ4 «100».

Измерительное устройство представляет собой набранную из пластин 1, 2, 3 трехслойную систему, в которой пластина из исследуемого материала 1 контактирует с одной стороны с пакетом из двух пластин 2, 3 из материалов с известными ТФХ. Между этими пластинами находится плоский нагреватель 4. Таким образом, в данном измерительном устройстве отсутствует прямой контакт исследуемого материала с датчиками температуры и нагревателем, что позволяет исследовать ТФХ и химически агрессивных, и влагонасыщенных материалов. Пластина 2 представляет собой тепломер с нагревателем в плоскости $x = 0$. На известном расстоянии $x = l_3$ расположен датчик температуры, по показаниям которого вычисляют температуру поверхности исследуемого образца $x = L_3$.

Процесс переноса тепла в системе контактирующих тел представлен следующей системой краевых задач:

$$\partial U_n(x,t)/\partial t = a_n \left(\partial^2 U_n(x,t) / \partial x^2 \right), \quad L_3 \leq x \leq L_n, \quad t > 0; \quad (1)$$

$$U_n(x,0) = 0; \quad (2)$$

$$\lambda_n (\partial U_n(x,t) / \partial x) |_{x=L_3+0} = \lambda_3 (\partial U_3(x,t) / \partial x) |_{x=L_3-0}; \quad (3)$$

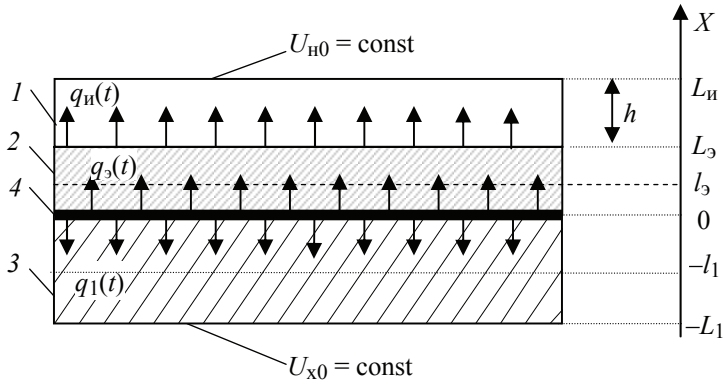


Рис. 2. Модель системы контактирующих тел:

1 – исследуемый образец (λ_n, a_n); 2 – верхний эталонный образец (λ_3, a_3); 3 – нижний эталонный образец (λ_1, a_1); 4 – источник тепла мощностью Q ; l_3, l_1 – плоскости расположения датчиков температуры; $h = L_n - L_3$ – толщина исследуемого образца; $U_{н0}, U_{х0}$ – избыточная температура нагревателя и холодильника соответственно

$$U_n(x, t)|_{x=L_n} = 0. \quad (4)$$

$$\partial U_3(x, t)/\partial t = a_3 \left(\partial^2 U_3(x, t)/\partial x^2 \right), \quad 0 \leq x \leq L_3, \quad t > 0; \quad (5)$$

$$U_n(x, t)|_{x=L_3+0} = U_3(x, t)|_{x=L_3-0}; \quad (6)$$

$$\lambda_3(\partial U_3(x, t)/\partial x)|_{x=0+0} = -q_{дз}(t); \quad q_{дз}(t) = \begin{cases} q_{дз} & \text{при } t \leq t_d \\ 0 & \text{при } t > t_d \end{cases}, \quad (7)$$

где индекс “д” указывает на дискретный (импульсный) способ подачи напряжения на нагреватель;

$$U_3(x, 0) = 0. \quad (8)$$

$$\partial U_1(x, t)/\partial t = a_1 \left(\partial^2 U_1(x, t)/\partial x^2 \right), \quad -L_1 \leq x \leq 0, \quad t > 0; \quad (9)$$

$$U_1(x, 0) = 0; \quad (10)$$

$$\lambda_1(\partial U_1(x, t)/\partial x)|_{x=0-0} = q_{1д}(t); \quad q_{1д}(t) = \begin{cases} q_{1д}, & \text{при } t \leq t_d \\ 0, & \text{при } t > t_d \end{cases}; \quad (11)$$

$$U_1(x, t)|_{x=-L_1} = 0. \quad (12)$$

Переведем систему (1) – (12) в область интегральных преобразований Лапласа по временной переменной t :

$$U(x, p) = \int_0^{\infty} \exp(-pt) U(x, t) dt; \quad (13)$$

$$q(p) = \int_0^{\infty} \exp(-pt) q(t) dt, \quad p > 0. \quad (14)$$

Система контактирующих образцов (1) – (12) в области временных интегральных характеристик (**ВИХ**) примет вид линейных дифференциальных уравнений:

$$(p/a_n) U_n(x, p) = d^2 U_n(x, p) / d x^2, \quad L_3 \leq x \leq L_n; \quad (15)$$

$$\lambda_n (dU_n(x, p) / dx) |_{x=L_3+0} = \lambda_3 (dU_3(x, p) / dx) |_{x=L_3-0}; \quad (16)$$

$$U_n(x, p) |_{x=L_n} = 0; \quad (17)$$

$$(p/a_3) U_3(x, p) = d^2 U_3(x, p) / d x^2, \quad 0 \leq x \leq L_3; \quad (18)$$

$$U_n(x, p) |_{x=L_3+0} = U_3(x, p) |_{x=L_3-0}; \quad (19)$$

$$\lambda_3 (dU_3(x, p) / dx) |_{x=0+0} = -q_3(p) (1 - \exp(-pt_d)); \quad (20)$$

$$(p/a_1) U_1(x, p) = d^2 U_1(x, p) / d x^2, \quad -L_1 \leq x \leq 0; \quad (21)$$

$$\lambda_1 (dU_1(x, p) / dx) |_{x=0-0} = q_1(p) (1 - \exp(-pt_d)); \quad (22)$$

$$U_1(x, p) |_{x=-L_1} = 0. \quad (23)$$

Решая поставленную задачу относительно ТФХ, получим расчетные формулы:

$$\lambda_n = \lambda_3 \frac{\sqrt{g_3} h}{\sqrt{g_n} L_3} \frac{\text{th}(\sqrt{g_n}) \text{th}(\sqrt{g_3})}{\left(\frac{q_3(p)}{q_n(p) \text{ch}(\sqrt{g_3})} - 1 \right)}$$

или

$$\lambda_n = \lambda_3 \frac{\sqrt{g_3} h}{\sqrt{g_n} L_3} \frac{\text{th}(\sqrt{k g_n}) \text{th}(\sqrt{k g_3})}{\left(\frac{q_3(k p)}{q_n(k p) \text{ch}(\sqrt{k g_3})} - 1 \right)}, \quad k > 1. \quad (24)$$

Температуропроводность исследуемого материала a_n вычисляется по формуле

$$a_n = p h^2 / g_n. \quad (25)$$

Результаты измерения теплопроводности плоских образцов пористых теплозащитных материалов из вспененного полистирола

$h_n, \text{ м}$	$t_x, ^\circ\text{C}$	$t_T, ^\circ\text{C}$	$\lambda_n, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$R_k, \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$	$q_n, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	$t, \text{ мин}$
Европлэкс ТУ 5767-055-00288490-2008						
0,0075	15	30	0,034	0,220	67,7	29
0,0069			0,035	0,197	76,1	28
0,0054			0,034	0,158	94,4	29
URSA XPS N-III NE 5767-001-56864652-2008						
0,0069	15	30	0,032	0,215	69,6	–
0,0066				0,206	72,7	30
0,0074				0,231	64,8	33
Пеноплэкс ТУ 5767-055-00288490-2008						
0,0063	15	30	0,032	0,196	76,4	–
0,0059			0,031	0,190	78,9	29
0,0059			0,030	0,196	76,3	30

Удельная объемная теплоемкость c_p определяется из соотношения

$$c_p = \lambda_{и} / a_{и}. \quad (26)$$

Так как по зависимости (26) определяется не истинная теплоемкость дисперсного материала, а так называемая эффективная, то в момент измерения ТФХ возникает необходимость измерения пористости исследуемого материала, зная которую, можно найти истинную плотность в зависимости (26). Пористость Π определяется по формуле $\Pi = (1 - \rho_v / \rho_t) \cdot 100\%$, где ρ_t – истинная плотность материала образца, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_v = m/v$, m – масса образца с порами, кг ; v – объем образца с порами, м^3 .

Для определения теплопроводности $\lambda_{и}$ исследуемых материалов воспользуемся действующей методикой для измерителя ИТП-МГ4 «100» [3].

Результаты измерений теплопроводности различных материалов представлены в таблице, где R_k – тепловое сопротивление образца при температурах «горячей» t_r и «холодной» t_x поверхностей.

Работа выполнена в рамках соглашения № 14.В37.21.0450 от 06.08.2012 г.

Список литературы

1. Чернышов, В. Н. Разработка теоретических основ и алгоритмического обеспечения неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов с метрологическим анализом полученных результатов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.13 / Чернышов Владимир Николаевич. – Тамбов, 1996. – 497 с.

2. Лыков, А. В. Теплообмен. Справочник / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1971. – 560 с.

3. Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 «100». Руководство по эксплуатации. – Челябинск : ООО «СКБ Стройприбор», 2008. – 29 с.

Temperature Field of Particulate Material in Contacting Bodies System

A. G. Filatova, A. A. Churikov, A. G. Divin

*Department: "Quality Management and Certification", TSTU;
kafedra@uks.tstu.ru*

Keywords: particulate materials; porosity; specific heat; thermal conductivity; thermal diffusivity; thermal physics.

Abstract: Disperse materials are the main stuff for production of composites and nanocomposites which have a wide application. Thermo-physical properties of disperse materials strongly depend on porosity, density and temperature. This paper includes physical and mathematical models of the measurement device to determine heat capacity, heat conduction, thermal diffusivity and porosity which must be considered for disperse materials production.

References

1. Chernyshov V. N. *PhD dissertation (Engineering)*, Tambov, 1996, 497 p.
 2. Lykov A.V. *Teplomassoobmen. Spravochnik* (Heat and mass transfer. Directory), Moscow: Energiya, 1971, 560 p.
 3. ООО «СКБ Стройприбор». *Izmeritel' teploprovodnosti ITP-MG 4 "100". Rukovodstvo po ekspluatatsii* (Heat Conductivity ITP-MG 4 "100". Instruction manual), Chelyabinsk, 2008, 29 p.
-

Temperaturfeld des dispersen Materials im System der kontaktierenden Körper

Zusammenfassung: Die dispersen Materialien sind die Hauptrohstoffe für die Produktion der Kompositen und der Nanokompositen, die die breite Verbreitung bekommen haben. Die wärmephysikalischen Eigenschaften der dispersen Materialien hängen von der Porosität, der Dichte und der Temperatur stark ab. Es sind die physikalischen und mathematischen Modelle der Messeinrichtung für die Bestimmung der Wärmekapazität, der Wärmeleitfähigkeit, der Temperaturleitfähigkeit, sowie der Porosität betrachtet, die man bei der Herstellung der Erzeugnisse aus den dispersen Materialien berücksichtigen muss.

Champs de température du matériel dispersé dans le système des corps en contact

Résumé: Les matériaux dispersés c'est la matière première pour la production des composites et des nanocomposites qui sont très répandus. Les propriétés thermophysiques des matériaux dispersés dépendent beaucoup de la porosité, de la densité et de la température. Sont examinés les modèles physiques et mathématiques du dispositif de mesure pour la définition de la capacité thermique, de la conductibilité de température ainsi que de la porosité qui sont nécessaire pour la production des articles à partir des matériaux dispersés.

Авторы: *Филатова Анастасия Геннадьевна* – аспирант кафедры «Управление качеством и сертификация»; *Чуриков Александр Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление качеством и сертификация»; *Дивин Александр Георгиевич* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Управление качеством и сертификация», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Пономарев Сергей Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление качеством и сертификация», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
