

МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ И УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

П.В. Балабанов, С.В. Мищенко, А.С. Костров

*Кафедра «Управление качеством и сертификация», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»;
pav-balabanov@yandex.ru*

Ключевые слова и фразы: математическая и физическая модели; метод измерения; оценка погрешности; удельная теплоемкость.

Аннотация: Приведена математическая модель метода определения удельной теплоемкости сыпучих материалов. В ходе эксперимента на стадии регулярного режима второго рода определяют объемную теплоемкость насыпного слоя сыпучего или пористого материала, а также удельный объем его твердой фазы, что позволяет вычислить удельную теплоемкость. Описана схема измерительного устройства для реализации предлагаемого метода. Приведены оценки погрешностей определения удельной теплоемкости.

Обозначения и аббревиатуры

a – температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$;
 c_p – объемная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$;
 l – координата границы слоя, м ;
 q – тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
 R – сопротивление, Ом ;
 S – площадь, м^2 ;
 T – температура, $^\circ\text{C}$;
 T_0 – начальная температура, $^\circ\text{C}$;
 U – напряжение, В ;
 W – мощность внутренних источников теплоты, $\text{Вт}/\text{м}^3$;
 x – пространственная координата;
 Δx – абсолютная погрешность измерения параметра x ;

λ – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;
 v – удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$;
 τ – время, с ;
 ИЯ – измерительная ячейка;
 СВ – сыпучее вещество;
 ТФХ – теплофизические характеристики.

Индексы

тф, гф – индексы, обозначающие твердую и газовую фазы СВ соответственно;
 1, 2, 3 – индексы, относящиеся к соответствующим слоям ИЯ.

При измерении ТФХ сыпучих материалов существенное влияние на получаемые результаты оказывает объем газовой фазы, заполняющей поры или пространство между частицами СВ. Изменение порозности слоя СВ вследствие протекающих в нем химических реакций или при изменении температуры будет оказывать существенное влияние на результаты измерения ТФХ. Поэтому возможность непрерывного определения в ходе эксперимента удельного объема твердой фазы СВ позволит повысить как точность измерения, так и информативность за счет дополнительного определения удельной теплоемкости исследуемого материала.

Целью настоящей работы является разработка метода определения удельной теплоемкости сыпучих неметаллических материалов с непрерывным контролем удельного объема твердой фазы. Разрабатываемый метод предлагается применить для исследования ТФХ зерновых хемосорбентов диоксида углерода на основе надпероксидов и гидрооксидов щелочных и щелочноземельных металлов в диапазоне температур от комнатных до $200\text{ }^\circ\text{C}$.

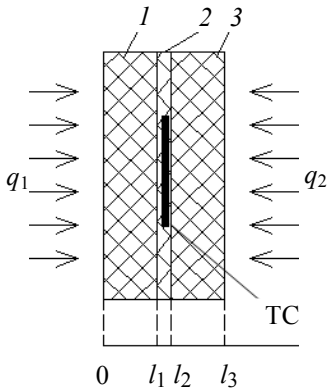


Рис. 1. Физическая модель ИЯ

В основу разрабатываемого метода положен известный метод [1] определения комплекса ТФХ, а также метод определения объема твердой фазы [2].

Физическая модель измерительной ячейки (рис. 1) представляет собой плоскую трехслойную систему. Слои 1 и 3 системы образованы насыпными слоями исследуемого материала, между которыми размещен слой 2, состоящий из нагревателя и термометра сопротивления ТС, выполненных из манганиновой и медной проволок и отделенных от исследуемых образцов тонкими пластинами из материала с высокой теплопроводностью. На внешних поверхностях исследуемых образцов заданы тепловые потоки q_1 и q_2 .

Математическая модель, описывающая температурное поле в ИЯ, сформулирована при следующих допущениях: 1) теплоперенос излучением в исследуемых образцах отсутствует; 2) температурное поле внутри системы для области измерения температур считается одномерным; 3) термические сопротивления на границах контакта слоев отсутствуют при условии поджатия исследуемых образцов; 4) на внешних границах исследуемых образцов заданы постоянные тепловые потоки; 5) мощность, выделяемая на нагревателе, равномерно распределена по всему объему слоя 2. С учетом допущений, математическая модель записана в виде системы дифференциальных уравнений теплопроводности:

$$\frac{\partial \Theta_i(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = \bar{a}_i \frac{\partial^2 \Theta_i(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2} + \bar{W}_i, \quad 0 < \bar{x} < 1, \quad Fo > 0, \quad i = \overline{1, 3}, \quad (1)$$

с начальными условиями

$$\Theta_i(\bar{x}, 0) = 0 \quad (2)$$

и граничными условиями

$$\frac{\partial \Theta_1(0, Fo)}{\partial x} = -\frac{\lambda_2}{\lambda_1}, \quad (3)$$

$$\Theta_i\left(\frac{l_i}{l_3} - 0, Fo\right) = \Theta_{i+1}\left(\frac{l_i}{l_3} + 0, Fo\right); \quad (4)$$

$$\lambda_i \frac{\partial \Theta_i\left(\frac{l_i}{l_3} - 0, Fo\right)}{\partial \bar{x}} = \lambda_{i+1} \frac{\partial \Theta_{i+1}\left(\frac{l_i}{l_3} + 0, Fo\right)}{\partial \bar{x}}, \quad i = \overline{1, 2}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Theta_3(1, Fo)}{\partial x} = \frac{q_2}{q_1} \frac{\lambda_2}{\lambda_3}, \quad (6)$$

где $\bar{a}_i = a_i/a_2$; $\bar{W}_i = W_i l_3/q_1$, причем объемные мощности внутренних источников теплоты первого и третьего слоев равны $W_1 = W_3 = 0$, а объемная мощность внутренних источников теплоты второго слоя определяется как отношение мощности P нагревателя к объему V_2 второго слоя, то есть $W_2 = P/V_2$; $\Theta_i(\bar{x}, Fo)$ – безразмерная температура, определяемая из выражения $\Theta_i(\bar{x}, Fo) = \frac{T_i(x, \tau) - T_0}{q_1 l_3 / \lambda_2}$; $\bar{x} = x/l_3$ – безразмерная пространственная координата; $Fo = a_2 \tau / l_3^2$ – число Фурье.

Из теории теплопроводности известно, что поле температур $\Theta_i(\bar{x}, Fo)$ будет автомодельным относительно координаты Fo . Решение задачи (1) – (6) имеет следующий вид:

$$\Theta_i(\bar{x}, Fo) = AFo + F_i(\bar{x}), \quad i = \overline{1, 3},$$

где A – постоянный коэффициент; $F_i(\bar{x})$ – функции, имеющие вид:

$$F_i(\bar{x}) = \begin{cases} A \frac{a_2}{a_1} \frac{\bar{x}^2}{2} - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \bar{x} + C_1, & i = 1; \\ (A - \overline{W}_2) \frac{\bar{x}^2}{2} + C_{21} \bar{x} + C_{22}, & i = 2; \\ A \frac{a_2}{a_3} \frac{\bar{x}^2}{2} - \left(-\frac{q_2}{q_1} \frac{\lambda_2}{\lambda_3} + A \frac{a_2}{a_3} \right) \bar{x} + C_3, & i = 3. \end{cases}$$

Константы A , C_1 , C_{21} , C_{22} , C_3 определяются из граничных условий (3) – (6), а также из уравнения теплового баланса, записанного для системы слоев 1–3 на рис. 1. В частности, для A получено выражение

$$A = \frac{1 + \overline{W}_2(l_2/l_3 - l_1/l_3) + \frac{q_2}{q_1}}{\frac{c_1 \rho_1}{c_2 \rho_2} (l_1/l_3) - l_1/l_3 - \frac{c_3 \rho_3}{c_2 \rho_2} (l_2/l_3) + \frac{c_3 \rho_3}{c_2 \rho_2} + l_2/l_3}, \quad (7)$$

из которого с учетом $c_1 \rho_1 = c_3 \rho_3 = c\rho$ можно получить выражение для расчета объемной теплоемкости исследуемых образцов

$$c\rho = \frac{c_2 \rho_2 \left(\frac{1}{A} \left(1 + \frac{\overline{W}_2}{q_1} (l_2 - l_1) + \frac{q_2}{q_1} \right) + l_1/l_3 - l_2/l_3 \right)}{1 + l_1/l_3 - l_2/l_3}. \quad (8)$$

При исследовании пористых, волокнистых или сыпучих материалов их объемная теплоемкость будет складываться из двух составляющих – объемной теплоемкости твердой фазы и объемной теплоемкости газовой фазы, заполняющей поры, то есть $c\rho = (c\rho)_{\text{тф}} + (c\rho)_{\text{гф}}$.

Последнее выражение, при условии $(c\rho)_{\text{тф}} \gg (c\rho)_{\text{гф}}$, примет вид

$$c\rho \approx (c\rho)_{\text{тф}} \quad \text{или} \quad c\rho \approx c_{\text{тф}} m / V_{\text{тф}} = c_{\text{тф}} / v_{\text{тф}}.$$

Таким образом, удельная теплоемкость твердой фазы будет определяться из выражения $c_{\text{тф}} = c\rho v_{\text{тф}}$, а с учетом (8) получим

$$c_{\text{тф}} = c_2 \rho_2 \frac{\frac{1}{A} \left(1 + \frac{\overline{W}_2}{q_1} (l_2 - l_1) + \frac{q_2}{q_1} \right) + l_1/l_3 - l_2/l_3}{1 + l_1/l_3 - l_2/l_3} v_{\text{тф}}. \quad (9)$$

Обозначим: $h_o = l_1$ – толщина образца; $h_n = l_2 - l_1$ – толщина источника теплоты (нагревателя); $2h_o + h_n = l_3$; $\Gamma_1 = 1 + h_o / (2h_o + h_n) - (h_o + h_n) / (2h_o + h_n)$;

$Q = \frac{1}{A} \left(1 + \frac{U^2 / (RSh_n)}{q_1} h_n + \frac{q_2}{q_1} \right)$; $W_2 = U^2 / (RSh_n)$; $c_2 \rho_2 = c_n \rho_n$. Тогда (9) примет вид

$$c_{\text{тф}} = c_n \rho_n \frac{(Q + \Gamma_1 - 1)}{\Gamma_1} v_{\text{тф}}. \quad (10)$$

Схема измерительной ячейки показана на рис. 2. Исследуемые образцы (или насыпной слой) размещены в камере 1 между газопроницаемой оболочкой с нанесенными на нее нагревательным элементом 2 и измерителем температуры, которые выполнены из манганиновой и медной проволок соответственно. Внешние поверхности исследуемых образцов приведены в тепловой контакт с тонкими медными пластинами 3, на внешней поверхности которых размещены плоские нагреватели 4, которые, в свою очередь приведены в тепловой контакт с датчиками теплового потока 5. Описанная система теплоизолирована от окружающей среды изоляцией 6. В конструкции ячейки предусмотрен цилиндр 7 с поршнем 8, осуществляющим возвратно-поступательное движение. Полость цилиндра 7 соединена с камерой 9 и измерителем давления (на рис. 2 не показан).

Датчики теплового потока, применяемые в конструкции измерительной ячейки, предназначены для измерения тепловых потоков $q_{1и}$ и $q_{2и}$ с поверхностей нагревателей, что позволяет по известной мощности, выделяемой на нагревателях и определяемой по выражению $U^2/(RS)$, определять тепловые потоки через первый и второй образцы по формулам $q_1 = U^2/(RS) - q_{1и}$, $q_2 = U^2/(RS) - q_{2и}$.

Способ определения удельной теплоемкости материалов реализуется следующим образом. Перед помещением в камеру анализируемого материала определяют его массу m и атмосферное давление $P_{атм}$. Засыпают исследуемый сыпучий материал в камеру 1 (см. рис. 2) и герметизируют камеру. Подводят постоянное напряжение U к нагревателям 4 и 2 измерительной ячейки. На каждом шаге во времени τ измеряют среднеинтегральную температуру $\bar{T}_2(\tau)$ нагревателя 2. Вычисляют безразмерную среднеинтегральную температуру $\bar{\Theta}_2(Fo) = \frac{\bar{T}_2(\tau) - T_0}{q_1(2h_o + h_n)/\lambda_n}$

и число Фурье $Fo = \frac{a_n \tau}{(2h_o + h_n)^2}$. При достижении регулярного теплового режима

второго рода регистрируют $\bar{\Theta}_2(Fo)$ и в заданном интервале безразмерного времени $[Fo^*, Fo^{**}]$ вычисляют A по формуле $A = [\bar{\Theta}_2(Fo^{**}) - \bar{\Theta}_2(Fo^*)] / [Fo^{**} - Fo^*]$ (рис. 3).

В ходе эксперимента уменьшают суммарный объем камер 1 и цилиндра 7 на величину ΔV , измеряют давление ΔP в камере с исследуемым материалом.

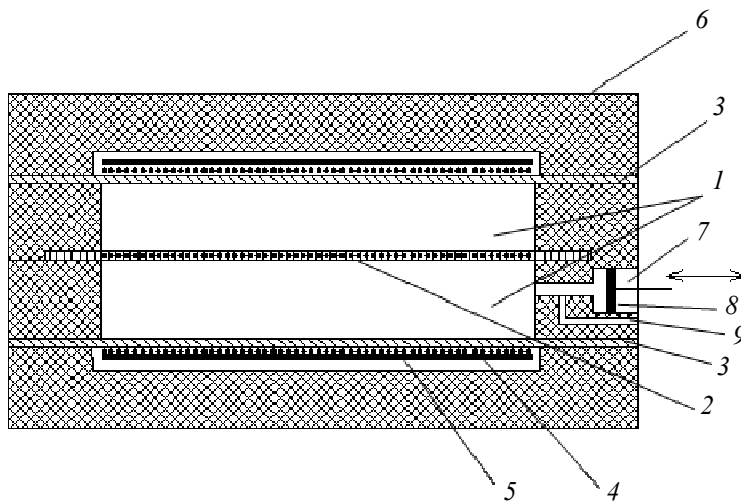


Рис. 2. Схема ИЯ

Удельный объем твердой фазы определяют из уравнения

$$v_{\text{тф}} = V/m - kP_{\text{атм}}/\Delta P,$$

где V – суммарный объем камеры I , в которой размещен исследуемый материал, и цилиндра 7 ; k – коэффициент пропорциональности.

Определение удельного объема твердой фазы анализируемого материала осуществляется дискретно с заданным шагом.

Искомую удельную теплоемкость вычисляют по формуле (10).

Оценим погрешность определения удельной теплоемкости. Для этого применим традиционные подходы теории погрешностей измерений [3, 4] к расчетному выражению (9) и получим расчетную формулу для вычисления среднеквадратичной погрешности определения удельной теплоемкости

$$\left(\frac{\Delta c_{\text{тф}}}{c_{\text{тф}}}\right)_{\text{ск}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta c_2 \rho_2}{c_2 \rho_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v_{\text{тф}}}{v_{\text{тф}}}\right)^2 \frac{1}{F_1^2} E_1 + \frac{1}{F_2^2} E_2},$$

где $F_1 = \frac{1}{A} + \frac{W_2}{q_1 A} (l_2 - l_1) + \frac{q_2}{q_1} \frac{1}{A} + \frac{l_1}{l_3} - \frac{l_2}{l_3}$; $F_2 = 1 + \frac{l_1}{l_3} - \frac{l_2}{l_3}$; $E_2 = \left[\frac{\partial F_2}{\partial l_1} \Delta l\right]^2 + \left[\frac{\partial F_2}{\partial l_2} \Delta l\right]^2 + \left[\frac{\partial F_2}{\partial l_3} \Delta l\right]^2$; $E_1 = \sum_{i=1}^7 \left[\frac{\partial F_1}{\partial x_i} \Delta x_i\right]^2$, причем в качестве переменных x_i используют переменные из ряда $x_i \in [q_1; q_2; W_2; l_1; l_2; l_3; A]$.

При условии $q_1 = q_2 = q$ значение параметра A можно определить (см. рис. 3) по формуле

$$A = \frac{\bar{\Theta}_2^{**} - \bar{\Theta}_2^*}{\text{Fo}^{**} - \text{Fo}^*} = \frac{l_3 c_2 \rho_2}{q} \frac{\bar{T}_2^{**} - \bar{T}_2^*}{\tau^{**} - \tau^*},$$

из которой легко получить формулу для оценки среднеквадратичной погрешности определения указанного параметра

$$\left(\frac{\Delta A}{A}\right)_{\text{ск}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{l_3}\right)^2 + \left(\frac{\Delta c_2 \rho_2}{c_2 \rho_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta T}{\bar{T}_2^{**} - \bar{T}_2^*}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta \tau}{\tau^{**} - \tau^*}\right)^2}. \quad (11)$$

Задаваясь геометрическими размерами слоев ИЯ, свойствами слоев, значением теплового потока q , абсолютными погрешностями указанных величин, а также абсолютными погрешностями измерения температур и времени, рассчитаем зависимость $(\Delta c_{\text{тф}}/c_{\text{тф}})_{\text{ск}} = f(\bar{T}_2^{**} - \bar{T}_2^*)$ (рис. 4).

Для получения показанной зависимости в расчетах использовались следующие значения: l_1, l_2, l_3 равны 3, 4, 7 мм соответственно; в качестве ТФХ слоев I и 3 взяты свойства полиметилметакрилата, слоя 2 – свойства алюминия; $W_2 = 0$; $q = 250$ Вт/м². Абсолютные погрешности: измерения толщин слоев $\pm 0,05$ мм; температур $\pm 0,1$ °С; мощности теплового потока ± 14 Вт/м² (оценивалась исходя из погрешностей измерения напряжений, подводимых к нагревателям, и сопротивлений нагревателей).

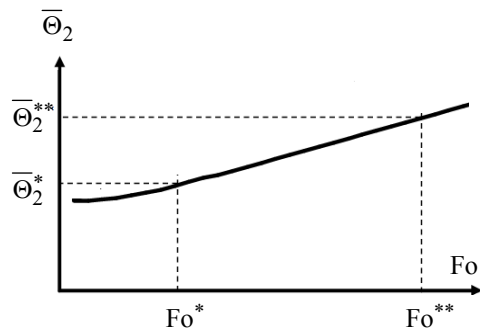


Рис. 3. График зависимости безразмерной температуры $\bar{\Theta}_2$ от числа Фурье Fo

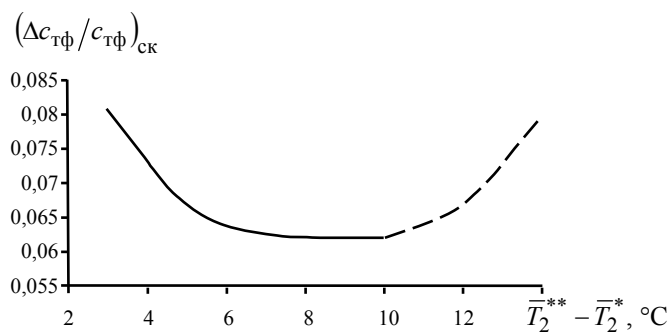


Рис. 4. График зависимости среднеквадратичной погрешности определения удельной теплоемкости от температуры

Оценка погрешности определения удельной теплоемкости позволяет сделать вывод о целесообразности проведения дальнейших работ по созданию технических средств для реализации разработанного метода.

Выводы

Для определения удельной теплоемкости сыпучих и пористых материалов предлагается использовать метод, основанный на теории регулярного режима второго рода с непрерывным контролем удельного объема твердой фазы исследуемого материала.

В целях повышения точности и оперативности измерения удельной теплоемкости необходимо использовать экспериментальные данные, полученные в интервале безразмерного времени $[\text{Fo}^*; \text{Fo}^{**}]$. При определении граничных точек указанного интервала учитывают геометрические размеры исследуемых образцов и конструктивных элементов измерительной ячейки, мощности нагревательных элементов, теплофизические характеристики материалов из которых изготавливают ИЯ.

Работа выполнена в соответствии с соглашением № 14.В37.21.0450.

Список литературы

1. Балабанов, П.В. Метод и устройство для измерения теплофизических свойств образцов регенеративного продукта на матрице при нагреве их постоянным тепловым потоком / П.В. Балабанов, С.В. Пономарев, Е.Н. Балабанова // Измер. техника. – 2009. – № 5. – С. 49–53.
2. Мордасов, Д.М. Технические измерения плотности сыпучих материалов : учеб. пособие / Д.М. Мордасов, М.М. Мордасов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 80 с.
3. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / под ред. С.В. Пономарева. – М. : Физматлит, 2008. – 408 с.
4. Пономарев, С.В. О выборе оптимальных режимных параметров процесса измерения коэффициента температуропроводности теплоизоляционных материалов методом регулярного режима третьего рода / С.В. Пономарев, Д.А. Дивина, А.С. Щекочихин // Измер. техника. – 2012. – № 1. – С. 47–49.

Complex Measurement of Bulk and Specific Heat Capacity of Porous Materials and Measuring Device for its Implementation

P.V. Balabanov, S.V. Mishchenko, A.S. Kostrov

Department "Quality and Certification", TSTU

Key words and phrases: error estimation; heat capacity; mathematical and physical model; measurement method.

Abstract: The paper describes the method to determine heat capacity of bulk and porous materials. Measurement of properties is carried out at the stage of regular mode of the second kind. During the experiment the specific volume of the solid phase of bulk or porous materials is continuously measured. The measuring device for the realization of the proposed method has been described. The estimates of errors in determining the specific heat capacity have been given.

Methode der komplexen Bestimmung der räumlichen und spezifischen Wärmekapazität der Schüttstoffe und die Einrichtung für ihre Verwirklichung

Zusammenfassung: Es ist das mathematische Modell der Methode der Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität der streubaren und porösen Materialien angeführt. Im Laufe des Experimentes auf dem Stadium des regelmäßigen Regimes des zweiten Geschlechtes werden die räumliche Wärmekapazität der aufgeschütteten Schicht des streubaren oder porösen Materials, sowie den spezifischen Umfang seiner festen Phase bestimmt, was zulässt, die spezifische Wärmekapazität auszurechnen. Es ist das Schema der Messeinrichtung für die Realisierung der angebotenen Methode beschrieben. Es sind die Einschätzungen der Fehler der Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität angeführt.

Méthode de la définition complexe de la capacité thermique volumineuse et spécifique des matériaux pulvérilents et le dispositif pour sa réalisation

Résumé: Est donné le modèle mathématique de la méthode de la définition de la capacité thermique volumineuse et spécifique des matériaux pulvérilents et poreux. Au cours d'el'expérience au stade du régime régulier du deuxième genre on définit la capacité volumineuse de la couche rapportée ainsi que le volume spécifique de sa phase solide ce qui permet de calculer la capacité thermique spécifique. Est décrit le schéma du dispositif de mesure pour la réalisation de la méthode proposée. Sont citées les estimations des erreurs de la définition de la capacité thermique spécifique.

Авторы: *Балабанов Павел Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление качеством и сертификация»; *Мищенко Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, научный руководитель кафедры «Управление качеством и сертификация»; *Костров Антон Сергеевич* – магистрант кафедры «Управление качеством и сертификация», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

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