

*П.В. Балабанов, С.В. Пономарев*

**РАСЧЕТ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПРОДУКТА ПО ЭФФЕКТИВНОМУ  
ЗНАЧЕНИЮ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОБРАЗЦА**

Результатами измерения теплопроводности образцов регенеративного продукта (РП) на основе надперекиси калия методом [1] являются эффективные значения теплопроводности. Как показали наши исследования, наличие воздушных полостей в образцах РП существенно влияет на теплопроводность образцов. Так, например, действительные значения теплопроводности РП отличаются от эффективных значений теплопроводности образцов на 20..40 %. В ряде случаев, например при исследовании закономерностей изменения ТФС РП в процессе регенерации [2], имеется возможность измерения только эффективных значений теплопроводности и температуропроводности. Поэтому актуальной задачей является разработка методики расчета действительных значений ТФС РП по измеренным эффективным значениям ТФС образцов.

Анализ литературных источников [3, 4] показал, что в настоящее время теория расчета эффективной теплопроводности твердых смесей и композиционных материалов достаточно хорошо развита. Это связано с огромным ассортиментом этих материалов. Воспользуемся методикой расчета эффективной теплопроводности, описанной в [3].

Обозначим для связанной системы (исследуемый образец) через  $V_1, V_{2к}, V_{2сп}$  объемы зерен, пор в каркасе и сквозных пор в структуре второго порядка. Общий объем системы  $V = V_1 + V_{2к} + V_{2сп}$ .

Пористость каркаса  $m_{2к}$ , пористость структуры второго порядка  $m_{2сп}$  и общая пористость  $m_2$  равны:

$$m_2 = \frac{V_{2к} + V_{2сп}}{V}, \quad m_{2сп} = \frac{V_{2сп}}{V}, \quad m_{2к} = \frac{V_{2к}}{V_1 + V_{2к}}. \quad (1)$$

Введя обозначения  $m_2^0, m_{2к}^0, m_{2сп}^0$ , соответствующие общей пористости, пористости каркаса и структуры второго порядка в исходном состоянии свободной засыпки (до прессования) получим формулу

$$m_{2сп}^0 = 1 - \frac{1 - m_2^0}{1 - m_{2к}^0}. \quad (2)$$

Эффективная теплопроводность  $\lambda$  регенеративного продукта связана с действительным значением теплопроводности  $\lambda_d$  частиц регенеративного продукта соотношениями [3]

$$\lambda = \lambda_d \frac{y_2 y_3}{y_4^2} \quad \text{или} \quad \lambda_d = \lambda \frac{y_4^2}{y_2 y_3} \quad (3)$$

где  $y_2, y_3, y_4$  – размеры частицы, вычисляемые по формулам [3]:

$$y_2 \approx 1,77\sqrt{\chi_k}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} y_3^0 = 2\sqrt{N_k - 1}/N_k, \\ y_4^0 = y_3^0/\sqrt{1 - m_{2к}^0}, \end{cases} \quad (5)$$

$$y_4 = y_4^0(1 - \chi_k), \quad (6)$$

где  $N_k$  – число контактов, приходящихся на одну частицу

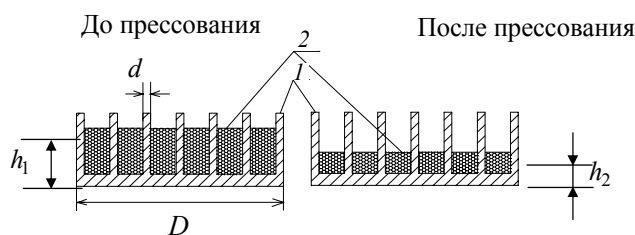
$$N_k = \left[ m_{2к}^0 + 3 + \sqrt{(m_{2к}^0)^2 - 10m_{2к}^0 + 9} \right] / (2m_{2к}^0), \quad (7)$$

$\chi, \chi_k$  – полная относительная деформация системы и относительная деформация частиц в каркасе, вычисляемые по формулам [3]

$$\chi = 1 - \sqrt[3]{\frac{1 - m_2^0}{1 - m_2}}, \quad (8)$$

$$\chi_k = \frac{1 - \sqrt[3]{1 - m_{2к}^0}}{1 - \sqrt[3]{1 - m_2^0}} \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{1 - m_2^0}{1 - m_2}} \right). \quad (9)$$

Прессование навески порошков, образующих РП, осуществляется в гидравлическом прессе ПБ-476. На рис. 1 изображены пресс-формы 1 с регенеративным продуктом 2 в свободной засыпке (до прессования) и после прессования.



**Рис. 1 К определению пористости**

Для определения начальной и конечной пористости мы располагаем следующими данными: насыпная плотность навески порошков РП  $\rho^0 = 500 \text{ кг/м}^3$ ; масса навески  $m^0 = 62 \text{ г}$ ; диаметр внутренней поверхности пресс-формы  $D = 113 \text{ мм}$ ; диаметр штыря пресс-формы  $d = 4 \text{ мм}$ ; число штырей  $n = 181$ ; высота спрессованного образца  $h_2 = 8 \text{ мм}$ .

Вычисление действительной теплопроводности регенеративного продукта  $\lambda_d$  проводим в следующей последовательности:

1 Вычисляем насыпной объем навески

$$V^H = m^0 / \rho^0 = 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

2 Из формулы  $\left( \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} n \right) h_1 = V^H$  определяем высоту насыпного слоя  $h_1 = 0,0161 \text{ м}$ .

3 Объем, занимаемый штырями пресс-формы, есть объем сквозных пор в структуре второго порядка, или в наших обозначениях

$$V_{2\text{сп}}^0 = \frac{\pi d^2}{4} n h_1 = 0,37 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Общий объем системы до прессования равен

$$V^0 = \frac{\pi D^2}{4} h_1 = 1,61 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

4 Общий объем системы после прессования

$$V = \frac{\pi D^2}{4} h_2 = 0,752 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Объем сквозных пор в структуре второго порядка после прессования равен

$$V_{2\text{сп}} = \frac{\pi d^2}{4} n h_2 = 0,17 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

5 Допустим, что регенеративный продукт спрессован полностью. Объем пор в каркасе равен нулю  $V_{2к} = 0$ , а пористость образца определяется только сквозными порами, т.е. общая пористость образца после прессования равна

$$m_2 = V_{2\text{сп}} / V = 0,226.$$

Вычисляем объем зерен  $V_1 = V - V_{2\text{сп}} = 0,582 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ .

Объем зерен до прессования равен объему после прессования, т.е.  $V_1^0 = V_1$ .

6 Вычисляем пористость материала до прессования

$$m_2^0 = \frac{V_{2к}^0 + V_{2\text{сп}}^0}{V^0} = 0,64.$$

Результаты расчетов действительного значения теплопроводности  $\lambda_d$  (Вт/(мК)) регенеративного продукта по измеренному эффективному значению теплопроводности  $\lambda = 0,18 \text{ Вт/(мК)}$  представлены в табл. 1.

## 1 К вычислению теплопроводности регенеративного продукта

$N_k$	$\chi$	$\chi_k$	$y_2$	$y_3$	$y_4^0$	$y_4$	$m_{2k}^0$	$m_2^0$	$m_2$	$\lambda_d$
7	0,22	0,17	0,72	0,72	1,05	0,87	0,53	0,64	0,23	0,26

Достоверность предлагаемой методики была проверена экспериментальными данными. В экспериментах измерялась теплопроводность  $\lambda_d^3 = 0,25$  Вт/(мК) специально изготовленных сплошных образцов регенеративного продукта.

Из полученных данных видно, что экспериментальные значения  $\lambda_d^3$  отличаются от расчетных  $\lambda_d$  не более чем на 5 %, что подтверждает правильность изложенной методики расчета.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Пономарев С.В., Балабанов П.В., Пономарева Е.С. Метод и устройство для измерения теплофизических характеристик регенеративных продуктов // Измерительная техника. 2003. № 9. С. 51 – 54.
- 2 Балабанов П.В., Пономарев С.В. Исследование закономерности изменения теплофизических характеристик регенеративных продуктов в процессе регенерации. VIII Научн. конференция ТГТУ: Тез. докл. Тамбов. 2003. Ч. 1. С. 73 – 74.
- 3 Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
- 4 Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиции. М.: Мир, 1968. 463 с.

*Кафедра «Автоматизированные системы и приборы»*