

Теплометрия, энерго- и ресурсосбережение: Об. науч. тр. /АН УССР.
Ин-т пробл. энергосбережения; Редкол.: А.Е.Степанов (отв. рад.)
и др. - Киев, 1989. - 123 с.

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований по теплотрическим приборам, математическому моделированию энергоемких технологий, тепловых и энерготехнологических объектов. Представлены работы методологического характера. Приведено описание математического обеспечения и программных средств моделирования.

Для научных сотрудников, аспирантов и инженеров, занимающихся вопросами теплоэнергетики, энергосбережения и математического моделирования.

Редакционная коллегия

А.Е.Степанов (ответственный редактор), Т.Г.Грищенко, Л.Г.Кириллова (заместитель ответственного редактора), Н.П.Потапова (ответственный секретарь), В.Н.Скорик

Рецензент доктор технических наук, профессор М.В.Страдомский

Утверждено к печати ученым советом Института проблем энергосбережения АН УССР

УДК 536.2.083

О. А. ГЕРАЩЕНКО, Т. Г. ГРИЩЕНКО, Л. В. ДЕКУША, В. П. САЛО,
А. Г. МАЗУРЕНКО, Д. П. КОЛОМИЕЦ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ КОМПАРИРОВАНИЯ

Приведена схема устройства для определения комплекса теплофизических свойств в квазистационарном тепловом режиме методом компарирования в сочетании с теплоточными измерениями, дано теоретическое обоснование метода и оценка погрешностей.

Налаженный в СССР выпуск и аттестация образцовых мер теплофизических свойств материалов, а также наличие высокочувствительных преобразователей теплового потока $[I]$ создали базу для разработки теплотметрических приборов, основанных на компарировании, т. е. на сличении свойств исследуемого материала и образцовой меры.

Характерной особенностью этих приборов является наличие неконтролируемых контактных термических сопротивлений и тепловых емкостей, снижающих точность определения соответственно теплопроводности и теплоемкости. Значительные погрешности возникают также при измерении малых изменений температуры в пространстве и времени.

Исключить влияние указанных факторов и определяемые характеристики можно путем сочетания метода компарирования с теплоточными измерениями.

Устройство, реализующее описываемый метод определения комплекса теплофизических свойств сыпучих материалов (рис. 1), состоит из четырех измерительных ячеек, образованных парами теплотметрических пластин с смонтированными в них первичными преобразователями теплового потока $[I]$ 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6, 7 и 8 (далее — тепломеры), установленными соответственно на обращенных друг к другу поверхностях холодильника 9 и нагревателя 10, в которые смонтиро-

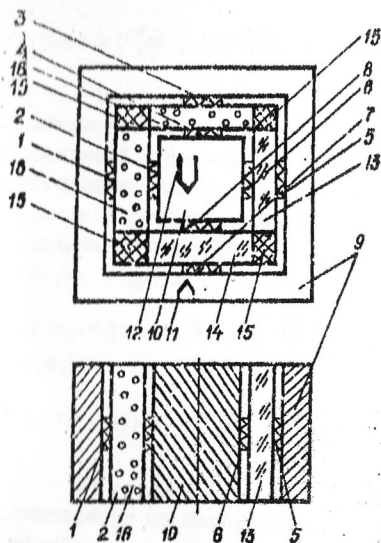


Рис. 1

задачи теплопроводности для бесконечной однородной пластины толщиной $2H$, скорость изменения температуры на границах которой задана одинаковой и постоянной ($\partial = \text{const}$) [2]. Для моментов времени, которым соответствуют числа $Fo \geq 2$, для любого сечения x пластины решения могут быть аппроксимированы по температуре $T(x, \tau)$ и плотности теплового потока $q(x, \tau)$ с погрешностью, не превышающей 0,25%, следующими функциями:

$$T(x, \tau) = \frac{T_{01} + T_{02}}{2} + \frac{\partial H^2}{a} \left(Fo - \frac{1}{2} \right) + \frac{T_{01} - T_{02}}{2} X + \frac{\partial H^2}{2a} X^2, \quad (1)$$

$$q(x, \tau) = -\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} = q_0 + \frac{\delta \lambda}{a} H X, \quad (2)$$

где $X = \frac{x}{H}$ - безразмерная координата; τ - время; λ - теплопроводность; T_{01} и T_{02} - начальные температуры граней пластины.

Каждая измерительная ячейка в рабочем состоянии (рис. 2) может быть рассмотрена как многослойная бесконечная пластина, симметричная относительно выбранного начала координат и расположенная между двумя блоками (холодильником 9 и нагревателем 10), обеспечивающими двусторонний нагрев с постоянной скоростью ($\partial = \text{const}$).

ваны первичные преобразователи температуры И1 и И2. Расстояние между тепломерами в каждой ячейке задается с помощью съемных дистанционирующих пластин И3 и И4, изготавливаемых из материалов, аттестованных в качестве образцовых мер теплопроводности и теплоемкости. Измерительные ячейки разделены теплового изоляционными вкладышами И5, размеры которых согласованы с размерами пластин И3 и И4. Образец исследуемого материала И6 помещают в измерительные ячейки, образованные парами тепломеров И1 и И2, И3 и И4.

В основу метода измерения положено решение одномерной задачи теплопроводности для бесконечной однородной пластины, толщи-

Пластина состоит из последовательно расположенных следующих однородных слоев:

- контактного слоя 17 толщиной h_1 и температуропроводностью a_1 , находящегося между холодильником 9 и тепломером 1 (3, 5 или 7);
- тепломера 1 (3, 5 или 7) толщиной h_2 и температуропроводностью a_2 ;

- контактного слоя 18 толщиной h_3 и температуропроводностью a_3 , расположенным между тепломером 1 (3, 5 или 7) и исследуемым материалом 16 (или эталонным материалом дистанционирующих пластин 13 или 14);

- слоя материала толщиной $2h_4$ и температуропроводностью a_4 (исследуемого 16 или эталонного 13 или 14);

- контактного слоя 19 толщиной h_5 и температуропроводностью a_5 , расположенного между материалом 16 (13 или 14) и тепломером 2 (4, 6 или 8);

- тепломера 2 (4, 6 или 8) толщиной h_2 и температуропроводностью a_2 ;

- и наконец, контактного слоя 20 толщиной h_1 и температуропроводностью a_1 , находящегося между тепломером 2 (4, 6 или 8) и нагревателем 10.

Для расчета температур и плотностей теплового потока в многослойной пластине воспользуемся полученными для однородной пластины функциями (1) и (2), заменив действительные значения толщин эквивалентными [3], исходя из соотношений

$$\frac{h_i^2}{a_i} = \frac{h_{i\text{ экв}}^2}{a_{\text{экв}}}, \quad i = 1, 2, 3, 4,$$

откуда

$$h_{i\text{ экв}} = h_i \sqrt{\frac{a_{\text{экв}}}{a_i}}. \quad (3)$$

Предположив $a_{\text{экв}} = a_4$, с учетом (3) получим следующее выражение эквивалентной полутолщины $H_{\text{экв}}$ рассматриваемой многослойной пластины:

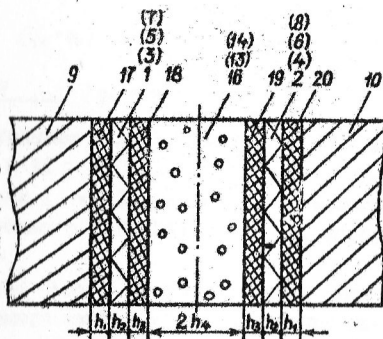


Рис. 2

$$H_{\text{экв}} = h_1 \sqrt{\frac{\alpha_{\text{экв}}}{\alpha_1}} + h_2 \sqrt{\frac{\alpha_{\text{экв}}}{\alpha_2}} + h_3 \sqrt{\frac{\alpha_{\text{экв}}}{\alpha_3}} + h_4 \quad (4)$$

При нагревании в квазистационарном тепловом режиме распределение плотностей теплового потока по толщине однородной (эквивалентной) пластины линейное, а сумма плотностей теплового потока в сечениях, равноудаленных от геометрического центра пластины выбранного начала координат и имеющих координаты X_1 и $X_2 = X_1$, величина постоянная, что следует из подстановки значений величины $\partial T / \partial x$ при $x = X_1$ и $x = X_2$:

$$q(X_1) + q(X_2) = \lambda_{\text{экв}} \left[\left(-\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=X_1} + \left(-\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=X_2} \right],$$

т.е.

$$q(X_1) + q(X_2) = \lambda_{\text{экв}} \frac{T_{01} - T_{02}}{H_{\text{экв}}}, \quad \text{где} \quad \lambda_{\text{экв}} = \lambda_4. \quad (5)$$

Из уравнения (1) с учетом (5) получаем выражение разности температур на поверхностях эквивалентной однородной пластины толщиной $2H_{\text{экв}}$ в каждый момент времени:

$$T(H_{\text{экв}}, \tau) - T(-H_{\text{экв}}, \tau) = \frac{H_{\text{экв}}}{\lambda_{\text{экв}}} (q_{H_{\text{экв}}} + q_{-H_{\text{экв}}}). \quad (6)$$

Согласно выражению (4) для каждой измерительной ячейки можно записать формулы для расчета эквивалентной полутолщины:

$$\begin{aligned} H_{\text{эквI}} &= \sum_{i=1}^3 h_i \sqrt{\frac{\alpha_{\text{экв}}}{\alpha_i}} + h_{\text{обp1}}, \\ H_{\text{эквII}} &= \sum_{i=1}^3 h_i \sqrt{\frac{\alpha_{\text{экв}}}{\alpha_i}} + h_{\text{обp2}} = \sum_{i=1}^3 h_i \sqrt{\frac{\alpha_{\text{экв}}}{\alpha_i}} + h_{\text{обp1}} + \Delta H_{\text{обp}}, \\ H_{\text{эквIII}} &= \sum_{i=1}^3 h_i \sqrt{\frac{\alpha_{\text{экв}}}{\alpha_i}} + h_{\text{э1}}, \\ H_{\text{эквIV}} &= \sum_{i=1}^3 h_i \sqrt{\frac{\alpha_{\text{экв}}}{\alpha_i}} + h_{\text{э2}} = \sum_{i=1}^3 h_i \sqrt{\frac{\alpha_{\text{экв}}}{\alpha_i}} + h_{\text{э1}} + \Delta H_{\text{э}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $h_{\text{обp1}}$, $h_{\text{обp2}}$ — полутолщины исследуемых образцов;
 $h_{\text{э1}}$, $h_{\text{э2}}$ — полутолщины эталонных образцов.

После подстановки значений эквивалентных полутолщин измерительных ячеек (7) в (6) получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} (T_{\text{H}} - T_{\text{K}})_{\text{I}} &= \frac{\sum_{i=1}^3 h_i \sqrt{\frac{\alpha_{\text{экв}}}{\alpha_i}} + h_{\text{обp1}}}{\lambda_{\text{обp}}} (q_1 + q_2), \\ (T_{\text{H}} - T_{\text{K}})_{\text{II}} &= \frac{\sum_{i=1}^3 h_i \sqrt{\frac{\alpha_{\text{экв}}}{\alpha_i}} + h_{\text{обp1}} + \Delta H_{\text{обp}}}{\lambda_{\text{обp}}} (q_3 + q_4), \end{aligned}$$

$$(T_H - T_X)_{III} = \frac{\frac{q}{\lambda_2} h_1 \sqrt{\frac{\alpha_{экр}}{\alpha_1}} + h_{з1}}{\lambda_2} (q_5 + q_6) ,$$

$$(T_H - T_X)_{IV} = \frac{\frac{q}{\lambda_2} h_1 \sqrt{\frac{\alpha_{экр}}{\alpha_1}} + h_{з1} + \Delta H_3}{\lambda_2} (q_7 + q_8) , \quad (8)$$

где T_H и T_X — температуры нагревателя и холодильника, измеряемые преобразователями температуры I2 и II; $q_1 - q_8$ — плотности теплового потока, измеряемые тепломерами I — 8; $\lambda_{обр}$, λ_3 — теплопроводности исследуемого (I6) и эталонного (I3, I4) образцов, которые для своих ячеек играют роль $\lambda_{экр}$.

Решив систему (8) относительно $\lambda_{обр}$, получим формулу для расчета теплопроводности исследуемого смучного материала при нагревании в квазистационарном режиме:

$$\lambda_{обр} = \lambda_3 \frac{\Delta H_{обр}}{\Delta H_3} \frac{(q_5 + q_6)^{-1} - (q_7 + q_8)^{-1}}{(q_1 + q_2)^{-1} - (q_3 + q_4)^{-1}} . \quad (9)$$

Используя уравнение (2) разности плотностей теплового потока в равноудаленных от геометрического центра сечениях однородной пластины, т.е. в X_1 и $X_2 = -X_1$, получим

$$q(X_1) - q(X_2) = \frac{\lambda \delta H(X_1 - X_2)}{a} = \text{ср} \delta 2HX_1 . \quad (10)$$

Так как в квазистационарном режиме тепломер измеряет плотность теплового потока, проходящего через его геометрический центр, измерительную ячейку можно рассматривать как многослойную пластину толщиной, равной расстоянию между геометрическими центрами обоих тепломеров ячейки.

Используя введенное выше понятие эквивалентной полутолщины (4), запишем для каждой измерительной ячейки значения величины HX_1 , входящие в формулу (10):

$$(HX_1)_I = H_{экр} - h_1 \sqrt{\frac{\alpha_{экр}}{\alpha_1}} - \frac{1}{2} h_2 \sqrt{\frac{\alpha_{экр}}{\alpha_2}} = \frac{h_2}{2} \sqrt{\frac{\alpha_{экр}}{\alpha_2}} + h_3 \sqrt{\frac{\alpha_{экр}}{\alpha_3}} + h_{обр1} ,$$

$$(HX_1)_{II} = \frac{h_2}{2} \sqrt{\frac{\alpha_{экр}}{\alpha_2}} + h_3 \sqrt{\frac{\alpha_{экр}}{\alpha_3}} + h_{обр1} + \Delta H_{обр} ,$$

(11)

$$(HX_1)_{III} = \frac{h_2}{2} \sqrt{\frac{\alpha_{экр}}{\alpha_2}} + h_3 \sqrt{\frac{\alpha_{экр}}{\alpha_3}} + h_{з1} ,$$

$$(HX_1)_{IV} = \frac{h_2}{2} \sqrt{\frac{\alpha_{экр}}{\alpha_2}} + h_3 \sqrt{\frac{\alpha_{экр}}{\alpha_3}} + h_{з1} + \Delta H_3 .$$

После подстановки выражений (II) в (10) получим систему уравнений

$$q_1 - q_8 = 2 (\text{ср})_{обр} \delta \left(\frac{h_2}{2} \sqrt{\frac{\alpha_{экр}}{\alpha_2}} + h_3 \sqrt{\frac{\alpha_{экр}}{\alpha_3}} + h_{обр1} \right) ,$$

$$\begin{aligned}
 q_3 - q_4 &= 2 (c\rho)_{обр} \delta \left(\frac{h_1}{2} \sqrt{\frac{\alpha_{жкб}}{a_2}} + h_3 \sqrt{\frac{\alpha_{жкб}}{a_3}} + h_{обр1} + \Delta H_{обр} \right), \\
 q_5 - q_6 &= 2 (c\rho)_3 \delta \left(\frac{h_1}{2} \sqrt{\frac{\alpha_{жкб}}{a_2}} + h_3 \sqrt{\frac{\alpha_{жкб}}{a_3}} + h_{31} \right), \\
 q_7 - q_8 &= 2 (c\rho)_3 \delta \left(\frac{h_1}{2} \sqrt{\frac{\alpha_{жкб}}{a_2}} + h_3 \sqrt{\frac{\alpha_{жкб}}{a_3}} + h_{31} + \Delta H_3 \right).
 \end{aligned} \quad (12)$$

Решив систему уравнений (12) относительно $(c\rho)_{обр}$, получим формулу для расчета объемной теплоемкости исследуемого материала:

$$(c\rho)_{обр} = (c\rho)_3 \frac{\Delta H_3}{\Delta H_{обр}} \frac{(q_7 - q_8) - (q_5 - q_6)}{(q_5 - q_6) - (q_7 - q_8)}. \quad (13)$$

Исходя из формул (9), (13) и соотношения $\alpha_{обр} = \lambda_{обр} / (c\rho)_{обр}$, получим формулу для расчета температуропроводности исследуемого образца:

$$\alpha_{обр} = \frac{\lambda_3}{(c\rho)_3} \frac{\Delta H_{обр}^2}{\Delta H_3^2} \frac{[(q_5 - q_6) - (q_7 - q_8)][(q_5 + q_6)^{-1} - (q_7 + q_8)^{-1}]}{[(q_7 - q_8) - (q_5 - q_6)][(q_7 + q_8)^{-1} - (q_5 + q_6)^{-1}]}. \quad (14)$$

Для термоэлектрических преобразователей теплового потока, выполненных по методу вспомогательной стенки, измеренная плотность теплового потока вычисляется по формуле

$$q_i = \kappa_i \varepsilon_i, \quad (15)$$

где κ_i и ε_i — соответственно коэффициент преобразования и термо-ЭДС i -го тепломера.

Подставив значения (15) в выражения (9), (13) и (14), получим формулы для вычисления теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности образца исследуемого материала:

$$\lambda_{обр} = \lambda_3 \frac{\Delta H_{обр}}{\Delta H_3} A_{2-3} \frac{(e_5 + A_{5-3} e_6)^{-1} - A_{5-3} (A_{7-3} e_7 + e_8)^{-1}}{(A_{4-2} e_1 + e_2)^{-1} - A_{2-3} (e_3 + A_{4-3} e_4)^{-1}}, \quad (16)$$

$$(c\rho)_{обр} = (c\rho)_3 \frac{\Delta H_3}{\Delta H_{обр}} A_{2-3} \frac{(A_{1-2} e_1 - e_2) - A_{3-2} (e_3 - A_{4-3} e_4)}{(e_5 - A_{5-3} e_6) - A_{5-3} (A_{7-3} e_7 - e_8)}, \quad (17)$$

$$\alpha_{обр} = \frac{\lambda_{обр}}{(c\rho)_{обр}}, \quad (18)$$

где $A_{i-j} = \frac{\kappa_i}{\kappa_j} = A_{j-i}$, $i, j = 1, 2, \dots, 8$ — безразмерные константы, определяемые в градуировочных опытах.

Градуировка устройства заключается в определении безразмерных констант A_{i-j} и сводится к прямому компарированию соответствующих пар тепломеров в четырех стационарных тепловых режимах, последовательно повторяемых для фиксированного положения нагревателя 10 при его поворотах на 90° .

Так, для положения нагревателя, соответствующего рис. 1, стационарный тепловой режим характеризуется следующей системой уравнений:

$$K_1 \theta_1 = K_2 \theta_2, \quad K_3 \theta_3 = K_6 \theta_6,$$

$$K_3 \theta_3 = K_4 \theta_4, \quad K_7 \theta_7 = K_8 \theta_8,$$

(19)

совместное решение которых дает искомые константы A_{1-2} , A_{4-3} , A_{6-5} и A_{7-8} .

Положение нагревателя, соответствующее первому повороту его на 90° по часовой стрелке, дает возможность из системы уравнений, аналогичных (19), определить константы A_{2-3} и A_{3-2} , а при двух последующих поворотах — A_{2-5} , A_{5-3} и A_{8-5} .

Из анализа формул (9), (13) и (14) следует, что для определения теплофизических свойств теплотметрическим способом не требуются измерения малых изменений температур в пространстве и времени, что позволяет повысить точность определения искомых характеристик.

Допускаемая относительная погрешность определения теплопроводности и теплоемкости, исходя из (16) и (17), может быть оценена по формуле [4]

$$\delta = \pm 1,1 \sqrt{\delta_\lambda^2 + 4(\delta_H)^2 + 8(\delta_{e_1})^2 + 7(\delta_{A_{i-j}})^2},$$

где δ_λ — предельная допускаемая относительная погрешность образцовой меры теплопроводности (3%) и теплоемкости (0,5%); δ_H — предельная допускаемая погрешность измерения толщины образцов, которая при использовании микрометра (ГОСТ 6507-60) для образцов толщиной не менее 10 мм составляет 0,1%; δ_{e_1} — предельная допускаемая относительная погрешность измерения термоЭДС, которая при использовании универсального вольтметра Ц-68002 в диапазоне В при минимальном уровне сигналов 10 мВ составляет 0,6%; $\delta_{A_{i-j}}$ — предельная допускаемая относительная погрешность определения величины безразмерной константы A_{i-j} , оцененная по формуле $\delta_{A_{i-j}} = \pm 1,1 \sqrt{\delta_{e_1}^2 + \delta_{e_2}^2}$, составляет 0,85%.

Таким образом, оценка погрешности теплотметрического компарирования при определении теплопроводности и объемной теплоемкости соответственно дает $\delta_\lambda = 4,2\%$, $\delta_{cp} = 2,6\%$, а значение температуропроводности, исходя из (18), может быть найдено с погрешностью, не превышающей 5,5%. Все это позволяет считать данный метод весьма перспективным при разработке рабочих средств измерения теплофизических характеристик, для которых допустимо правило $\delta_{тфх} \leq 3 \delta_\lambda$. Список литературы.

1. Геращенко О.А. Основы теплотметрии. — Киев: Наук.думка, 1971. — 192 с.
2. Определение комплекса теплофизических свойств дифференциально-мостовым теплотметрическим методом / О.А. Геращенко, Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша и др. // Инж.-физ. журн. — 1988. — 54, № 4. — С. 588-596.

3. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчет теплового режима твердых тел. - Л.: Энергия, 1976. - 352 с.
4. Вайсбанд М.Д., Проненко В.И. Техника выполнения метрологических работ. - Киев: Техника, 1986. - 168 с.

Получено 30.01.89

УДК 536.083

В.В.ВАСИЛЕВСКАЯ, Н.В.КИРЕЕВА, В.И.ШАПОВАЛОВ

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕНИИ ВИКСИНТА

На созданном в ИПЭ АН УССР приборе проведены измерения серии образцов композиций на основе висксинта. Выполнен анализ экспериментальных данных, позволяющий распространить их на более широкий круг аналогичных материалов. Полученная информация способствует широкому применению этих материалов в различных областях радиотехнической промышленности.

В радиоэлектронных устройствах даже при умеренных мощностях выделяемая теплота может значительно повысить температуру устройства в связи с высокой плотностью монтажа деталей и сравнительно низкой теплопроводностью герметизирующих композиционных материалов. Теплопроводность таких материалов определяет конструктивные параметры и показатели экономичности радио- и электротехнических изделий, что обуславливает повышение требований к точности определения и прогнозирования их теплофизических характеристик.

В связи с этим была поставлена задача определения теплопроводности некоторых композиционных материалов на основе висксинта с различными неорганическими наполнителями.

Для расчета теплопроводности применялась формула Оделевского [1]:

$$\frac{\lambda}{\lambda_1} = 1 - \frac{m_2}{\frac{1}{1-\nu} - \frac{1-m_2}{3}}, \quad \nu = \frac{\lambda_2}{\lambda_1},$$

где λ - эффективная теплопроводность системы; λ_1, λ_2 - теплопроводности компонентов.

Исходные данные приведены в табл. 1, результаты вычисления теплопроводности исследуемых образцов при $T = 300 \text{ К}$ - в табл. 2.

Таблица 1

Материал	Теплопроводность λ , Вт/м·К	Плотность ρ , г/см ³
Висксинт	0,200	1,11
Маршаллит	1,4	2,65
Нитрид бора	200	2,29
Окись алюминия	40	4,0

Таблица 2

Состав композиции		Количество весовых частей	Теплопроводность, Вт/м·К	
			λ расч. ср	λ изм. ср
<u>Композиция вискита с маршаллитом</u>				
Вискит ПК-68	100	0,263	0,225	
катализатор,	4			
маршаллит	40			
Вискит ПК-68	100	0,320	0,257	
катализатор,	4			
маршаллит	80			
Вискит ПК-68	100	0,398	0,396	
катализатор,	4			
маршаллит	120			
<u>Композиция вискита с окисью алюминия</u>				
Вискит ПК-68	100	0,265	0,203	
катализатор,	4			
окись алюминия	40			
Вискит ПК-68	100	0,330	0,237	
катализатор,	4			
окись алюминия	80			
Вискит ПК-68	100	0,396	0,350	
катализатор,	4			
окись алюминия	120			
<u>Композиция вискита с нитридом бора</u>				
Вискит ПК-68	100	0,316	0,299	
катализатор,	4			
нитрид бора	40			

Формулы для определения теплопроводности композиций получены на основе представлений, которые в реальных системах не всегда соблюдаются. Детальный анализ существующих экспериментальных методов определения теплопроводности показал, что наиболее приемлемыми для исследования композиционных материалов являются методы, разработанные для плоских образцов. Указанные методы выгодно отличаются простотой рабочей формулы, физической наглядностью