

УДК 536.2.083

*Шемет Т.Н. – ассистент, НМетАУ*

*Затопляев Г.М. – инженер-технолог, НМетАУ*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЛОКНИСТЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Предложена методика экспериментального определения коэффициента теплопроводности волокнистой теплоизоляции, основанная на зондовом методе. Приведены результаты экспериментальных исследований коэффициента теплопроводности образцов волокнистых теплоизоляционных материалов.*

### **Введение**

В связи с увеличением цен на энергоносители проблема теплоизоляции тепловых агрегатов становится одной из наиболее актуальных и, безусловно, расходы, затраченные на выполнение теплоизоляции, окупаются экономией топлива. Эффективным направлением в решении этой задачи является создание и использование новых видов теплоизоляционных материалов.

Опыт изготовления, монтажа и эксплуатации печей в различных отраслях промышленности показал, что применение футеровок из волокнистых материалов позволяет сократить трудовые затраты на монтаж в 2 – 3 раза; уменьшить материалоемкость конструкций печей, т.е. сократить расход огнеупоров в 10 – 12 раз и массу металлокаркасов на 15 – 20 %; сократить расход топлива и электроэнергии в печах периодического действия на 25 – 30 %, в печах непрерывного действия на 3 – 5 %; повысить производительность тепловых агрегатов периодического действия на 15 – 20 % благодаря более быстрому разогреву и охлаждению, а также увеличению рабочего пространства [1].

Разработка и создание новых материалов, теплофизические свойства которых определяются такими факторами, как физико-химические превращения, темп нагрева, широкий диапазон изменения температур и другие требует проведения экспериментов по определению теплофизических характеристик в реальных условиях работы материала. Это вызвало необходимость разработки методов определения теплофизических свойств: статистического, экспериментального и расчетно-экспериментального [2 – 4].

Одним из эффективных методов определения теплофизических свойств волокнистых материалов является экспериментальный метод, который в зависимости от режимов нагрева (охлаждения) подразделяется на группы: стационарные и нестационарные [3]. В настоящее время широкое распространение получил нестационарный зондовый метод определения теплофизических характеристик материалов [4, 6, 7].

Теплопроводность имеет особо важное значение, если речь идет о рациональной футеровке промышленных печей низкопроводящими огнеупорными материалами. Для определения теплопроводности огнеупорных изделий и изоляционных материалов в зависимости от температуры были разработаны различные методы [5].

В данной работе для определения коэффициента теплопроводности различных типов волокнистых материалов применен метод линейного источника постоянной мощности.

### Постановка задачи

Рассмотрим систему: зонд в виде цилиндра радиусом  $r_0$ , окруженный неограниченной средой. При  $\tau > 0$  в зонде выделяется количество тепла на единицу длины в единицу времени, равное  $q_1$ . Начальную температуру всей системы принимаем одинаковой и равной нулю.

Теплообмен поверхности зонда с окружающей средой (исследуемым материалом) подчиняется закону Ньютона. В дальнейшем индексом 1 отмечены параметры, относящиеся к зонду, а индексом 2 – к среде.

Задача формулируется в виде:

$$\frac{1}{a_2} \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad r_0 < r < \infty; \tau > 0, \quad (1)$$

$$T_1(0) = T_2(r, 0) = T_0, \quad (2)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(r_0, \tau)}{\partial r} = \frac{1}{R_{12}} [T_1(\tau) - T_2(r_0, \tau)], \quad (3)$$

$$(2\pi r_0) \left[ -\lambda_2 \frac{\partial T_2(r_0, \tau)}{\partial r} \right] = q_1 - m_1 c_1 \frac{\partial T_1(\tau)}{\partial \tau}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_2(\infty, \tau)}{\partial r} = 0, \quad (5)$$

где  $m_1$ , кг/м;  $c_1$ , Дж/(кг·К) – соответственно масса единицы длины и удельная теплоемкость зонда;  $\lambda_2$ ,  $a_2$  – соответственно коэффициенты тепло- и температуропроводности исследуемого материала;  $R_{12}$  – теп-

ловое сопротивление в зазоре между нагревателем и исследуемым материалом,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ .

Учет величины  $\alpha$  при испытании материалов, если известна толщина зазора  $\delta$ , возникшего в промежутке зонд-тело, выполняется по соотношению  $\alpha = \frac{\lambda_n}{\alpha}$ , где  $\lambda_n$  – коэффициент теплопроводности промежуточной среды. В случае идеального теплового контакта  $\alpha \rightarrow \infty$ .

Решение сформулированной задачи относительно температуры  $T_1(\tau)$ , полученное операционным методом [4], имеет вид

$$T_1(\tau) - T_0 = \frac{q_1}{4\pi\lambda_2} \left[ -\text{Ei} \left( -\frac{4a_2\tau}{r_0^2} \right) \right], \quad (6)$$

где  $\text{Ei} \left( -\frac{4a_2\tau}{r_0^2} \right)$  – экспоненциальный интеграл.

Решение (6) удобно и целесообразно использовать при больших числах Фурье,  $\text{Fo} = \frac{a_2\tau}{r_0^2} > 1$ ; тогда экспоненциальный интеграл представляется рядом, в котором достаточно сохранить первые два члена

$$T_1(\tau) - T_0 = \frac{q_1}{4\pi\lambda_2} \left[ \ln \frac{4a_2\tau}{cr_0^2} + \frac{r_0^2}{2a_2\tau} \ln \frac{a_2\tau}{cr_0^2} + \dots \right], \quad (7)$$

где  $c$  – число Эйлера.

Анализ решения (7) показывает, что с увеличением времени опыта ( $\tau \rightarrow \infty$ ) второй член выражения стремится к нулю, разность между константами, не зависящими от времени при измерении температур зонда в моменты времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  также равна нулю.

Тогда расчетная формула для определения коэффициента теплопроводности исследуемого материала  $\lambda_2$  в случае, если измерения избыточных температур зонда производить в моменты времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  ( $\tau_1 < \tau_2$ ), имеет вид:

$$\lambda_2 = \frac{q_1 \cdot \ln \frac{\tau_2}{\tau_1}}{4\pi [T_1(\tau_2) - T_1(\tau_1)]}, \quad (8)$$

где  $q_1 = W/L$ ,  $W$  – мощность электрического нагревателя.

Согласно исследованиям [8], влияние осевых потоков тепла в «зонде» становится несущественным, когда его размеры удовлетворяют соотношению  $\frac{L}{2r_0} \geq 30$ .

## Методика экспериментальных исследований

Метод определения заключается в пропускании тока постоянной мощности в течение 12 – 15 мин через тонкую проволоку диаметром, не превышающим 0,5 мм, помещенную в исследуемой среде, и измерении подъема температуры проволоки.

Величина  $\lambda$ , рассчитанная по измеренным значениям  $q_1$  и  $t(\tau_1)$ ,  $t(\tau_2)$ , относится к температуре среды (образца), при которой пропускается ток через проволоку. Следовательно, метод позволяет определить истинную теплопроводность, т.е. отнесенную к определенной температуре среды (образца).

На кафедре ТЭМП НМетАУ разработана и освоена установка для исследования коэффициента теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов в интервале температур 20 – 800 °С с применением измерительного креста. Схема установки показана на рис. 1.

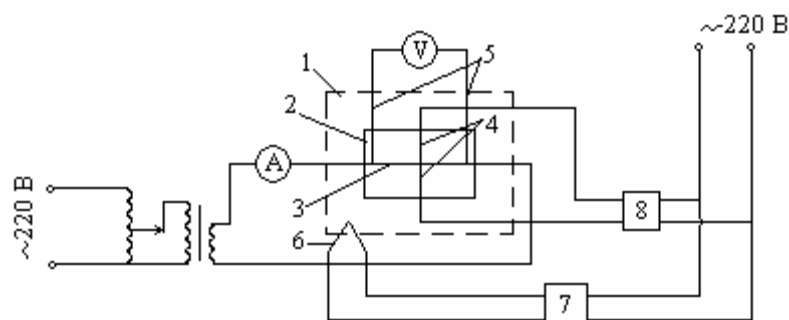


Рис. 1. Схема установки с «измерительным крестом» для определения  $\lambda$  волокнистых теплоизоляционных материалов методом горячей проволоки.

1 – печь; 2 – образец из двух кирпичей; 3 – нагреваемая проволока; 4 – термопара измерительного креста; 5 – потенциметрические зонды; 6 – термопара, измеряющая температуру печи; 7 – регулирующий прибор; 8 – самопишущий потенциометр



Рис. 2. Измерительный крест



Рис. 3. Исследуемый образец

Образцы нагревают в камерной лабораторной электропечи СНОЛ-1,6, рассчитанной на работу до 900 °С. Соответственно рабочему объему печи принят образец в виде параллелепипеда размерами 140×105×70 мм. Образец состоит из двух кирпичей (брусков) размерами 140×105×35 мм, плотно прилегающих один к другому благодаря шлифовке или притирке соприкасающихся поверхностей. Измерительный крест образуется из нагреваемой проволоки марки Х23Ю5Т диаметром 0,5 мм и термопары из хромель-алюмелевых термоэлектродов диаметром 0,2 мм. Для измерения падения напряжения на рабочем участке нагреваемой проволоки используются потенциометрические зонды из проволоки марки Х23Ю5Т диаметром 0,3 мм. Напряжение измеряется вольтметром переменного тока типа Э59 с классом точности 0,5. Составляющая т.э.д.с. проволоки, обусловленная нагревающим ее током, регистрируется самопишущим потенциометром КСП-4 с пределами измерения -0,1÷0,9 мВ, компенсация т.э.д.с. осуществлялась измерительным мостом Р 4833. По данным измерения строится график  $t(\ln\tau)$  и рассчитывается  $\lambda$  по участкам, на которых точки образуют прямые линии.

Анализ погрешностей определения  $\lambda$  на опытной установке, связанных с влиянием величины зазора и размеров образца, выполненный на ЭВМ методом наименьших квадратов, показал, что среднеквадратичная погрешность не превышает 10 %.

Для опробования установки определяли  $\lambda$  образцов шамота. Опытные данные в интервале 20 – 800 °С в пределах погрешности измерений совпадают с известными [9] (рис. 4).

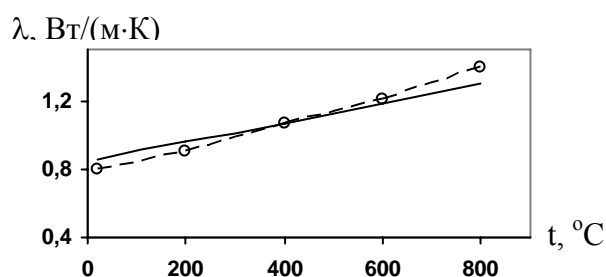


Рис. 4. Значения  $\lambda(t)$  шамота кл. А:  
 ----- опытные результаты;  
 ————— по данным [9]

### Анализ результатов экспериментальных исследований

Применяя разработанную методику определения  $\lambda$ , были получены коэффициенты теплопроводности волокнистых теплоизоляцион-

ных материалов с плотностью 385, 370, 220 кг/м<sup>3</sup> соответственно. Результаты приведены на рисунках 5, 6, 7 и в таблице 1

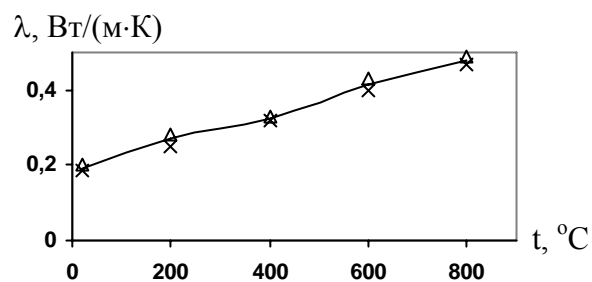


Рис. 5. Теплопроводность образцов (3 шт.) плотностью 385 кг/м<sup>3</sup>

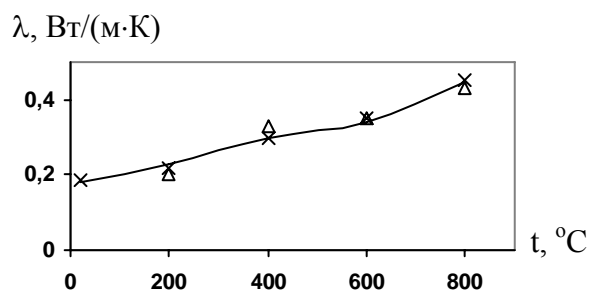


Рис. 6. Теплопроводность образцов (3 шт.) плотностью 370 кг/м<sup>3</sup>

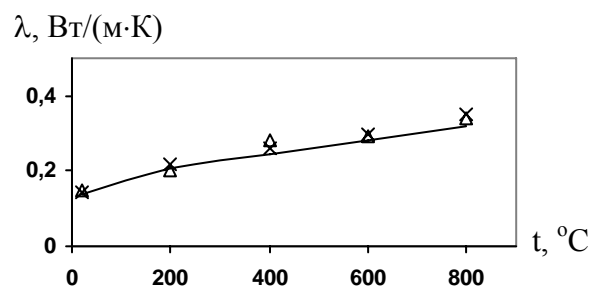


Рис. 7. Теплопроводность образцов (3 шт.) плотностью 220 кг/м<sup>3</sup>

Таблица 1

Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры

t, °C	λ, Вт/(м·К)		
	ρ = 385 кг/м <sup>3</sup>	ρ = 370 кг/м <sup>3</sup>	ρ = 220 кг/м <sup>3</sup>
20	0,192	0,18	0,138
200	0,27	0,23	0,21
400	0,326	0,3	0,243
600	0,415	0,34	0,28
800	0,48	0,448	0,32

## Выводы

1. Разработанная методика позволяет определить коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов в диапазоне температур 0 – 800 °С.
2. Сравнительный анализ определения  $\lambda$  эталонного материала (шамот) показывает удовлетворительное согласование со справочными данными.
3. Повышение точности определения  $\lambda$  требует учета теплоемкости зонда, конечных размеров измерительной ячейки как по оси, так и по радиусу.

## Список литературы

1. Мартыненко В.В., Дергапуцкая Л.А. Эффективные теплоизоляционные легковесные и волокнистые огнеупоры // Огнеупоры. – 1993. – № 6. – С. 19 – 21.
2. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности: В 2-х т. – К.: Наукова думка, 2003. – 1. – 460 с.; 2. – 392 с.
3. Тайц Н.Ю. Определение теплофизических свойств сталей и других веществ // Теплофизические свойства твердых тел. – М.: Наука, 1987. – С. 67 – 73.
4. Чудновский А.Ф. Теплофизика почв. – М.: Наука, 1976. – 352 с.
5. Ланда Я.А., Литовский Е.Я., Глазачев Б.С., Пучкелевич Н.А., Климович А.В. Определение теплопроводности огнеупорных материалов методом горячей проволоки // Огнеупоры. – 1978. – № 9. – С. 30 – 33.
6. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
7. Литовский Е.Я., Пучкелевич Н.А. Теплофизические свойства огнеупоров. – М.: Металлургия, 1982. – 150 с.
8. Филиппов П.И., Тимофеев А.М. Методы определения теплофизических свойств твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1976. – 104 с.
9. Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.

*Рукопись поступила 05.05.05.*