



УДК 669.046:536.2.083:519.876.5

ИНЖЕНЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Стерлигов, Д.А. Шадринцева

Сибирский государственный индустриальный университет,
ул. Кирова, 42, Новокузнецк, Россия, 654000, e-mail: schadrintseva.darya@yandex.ru

Аннотация. В статье представлен новый подход к интерпретации коэффициента теплопроводности пористых теплоизоляционных материалов. Приведены опытные данные по проверке гипотезы.

Ключевые слова: огнеупоры, пористость, теплопроводность, теплоизоляционный, «мостик».

С каждым годом возрастает необходимость в энерго- и ресурсосбережении с использованием современных технологий. Выбор оптимального теплоизоляционного материала с точки зрения структуры и теплофизических свойств во многом определяет эффективность использования тепла и экономию материалов, поэтому исследование теплопроводности тел неоднородной структуры является актуальной задачей. В статье представлены результаты нового подхода к интерпретации коэффициента теплопроводности пористых (теплоизоляционных) материалов.

Огнеупор – среда с равномерно распределенной пористостью, реализуемой пузырьками с газовым заполнением. В первом приближении, все пузырьки одного размера (гомогенная среда) и они равномерно распределены в теле огнеупора, поскольку нет никаких предпочтений для другого распределения. На рис. 1 представлена схема структуры пористого материала.

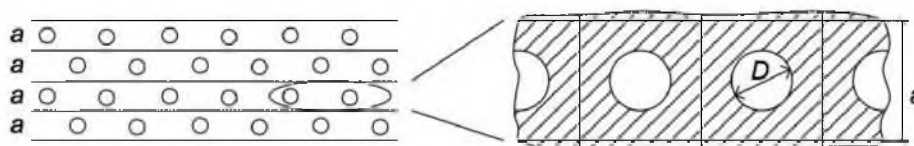


Рис. 1. Схема структуры пористого материала.

Если из схемы выделить монослой толщиной a , то в нем будут расположены пузырьки (газовые полости) размером D . Отношение площадей $S_D/S_a = \Pi$ равно пористости (порозности) материала. Так как $S_D = \frac{\pi D^2}{4}$, а $S_a = a^2$, то

$$S_D = \frac{\pi D^2}{4} / a^2. \quad (1)$$

Таким образом, можно пористость выразить через геометрию системы, используя отношение D/a .

Из уравнения (1) можно найти

$$D/a = \sqrt{\frac{4\Pi}{\pi}} = 1.128\sqrt{\Pi}. \quad (2)$$

Из уравнения (2) можно рассчитать величину D/a для разных значений Π , свести в табл. 1 и представить в виде графика (рис. 2).

Таблица 1

Значения отношения диаметра поры к толщине монослоя при различной пористости

Π	0,200	0,250	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,750	0,785
D	0.504	0.564	0.618	0,713	0,798	0,873	0,943	0,976	0,999

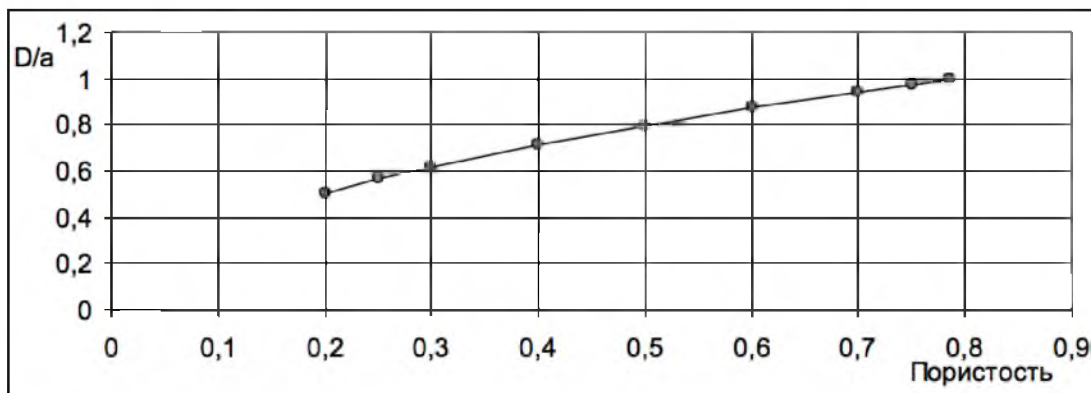


Рис. 2. Структура слоя пористого материала при различных пористости.

Очевидно, что при $D/a = 1$ и соответствующей ей пористости $\Pi = 0,785$ произойдет соединение отдельных пузырьков. Возникшая структура при $\Pi > 0,785$ представляет собой качественно иную картину: единая газовая полость, имеющая внутри некоторые элементы из основного материала, позволяющие сохранить геометрию структуры. Это свойственно волокнистым материалам. Поэтому предлагаемая гипотеза применима только для материалов с $\Pi < 0,785$.

Этот характерный размер используем для расчета теплопроводности. Эта задача решается как одномерная для плоской системы толщиной s с пузырьками внутри ее. Тепло проходит через «мостик» шириной b (рис. 3), определяемой из предположения, что площадь мостика в плоскости, перпендикулярной направлению потока q , $F_M = a^2 \cdot b$ численно равна площади, не занятой пузырьком, т.е. $F_M = a^2 \cdot (1 - \Pi)$.

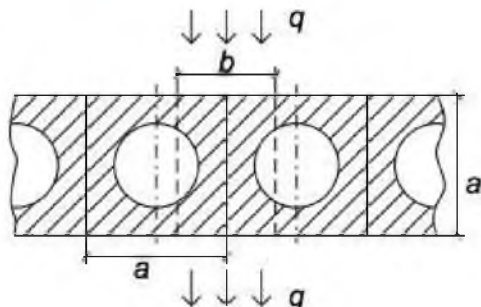


Рис. 3. Схема расположения «мостика» в пористом материале.

Отсюда можем записать

$$b = a \cdot (1 - \Pi). \quad (3)$$

Такое представление геометрии мостика позволяет заменить сложное сечение стенки по глубине на параллелепипед. Для более точного расчета можно использовать методику расчета теплопроводности через клиновидную стенку.

Количество тепла через ячейку (через все сечение) и через мостик будет соответственно:

$$Q_a = q \cdot a^2, \quad Q_b = q \cdot a \cdot b. \quad (4)$$

Сравнение этих двух случаев дает отношение, которое показывает долю тепла, проходящего через материал.

$$Q_b / Q_a = \frac{q \cdot a^2 \cdot (1 - \Pi)}{q \cdot a^2} = (1 - \Pi). \quad (5)$$

Величина q в обоих случаях принимается одна и та же, что предполагает условие отсутствия теплового потока через газовые пузырьки, т. е. $q_r = 0$, все тепло передается только через «мостик» основного материала.

Уравнение (5), по сути своей, представляет отношение теплового потока в классической интерпретации Q_a и теплового тока с «эквивалентной» теплопроводностью, т.е.

$$Q_b / Q_a = \frac{q_{\text{ЭКВ}} \cdot F_{\text{ГЕОМ}}}{q \cdot F_{\text{ГЕОМ}}}, \quad \text{где } q_{\text{ЭКВ}} = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}} \cdot \Delta t}{a} \text{ и } q = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}} \cdot \Delta t}{a}. \quad \text{Из этого следует}$$

$$\lambda_{\text{ЭКВ}}^{\text{М}} = \lambda_{\text{М}} \cdot (1 - \Pi). \quad (6)$$

Полученное выражение отличается от уравнения Г.П. Иванцова, о чем упоминается в [1], и не содержит «газовой» составляющей теплопроводности.

Влияние «газовой» теплопроводности можно учесть аналогичным образом, что дает

$$\lambda_{\text{ЭКВ}}^{\text{Г}} = \left(\frac{\Pi}{\lambda_{\text{Г}}} + \frac{(1 - \Pi)}{\lambda_{\text{М}}} \right)^{-1} = \frac{\lambda_{\text{Г}}}{\Pi + (1 - \Pi) \frac{\lambda_{\text{Г}}}{\lambda_{\text{М}}}} = \frac{\lambda_{\text{М}}}{(1 - \Pi) + \Pi \frac{\lambda_{\text{М}}}{\lambda_{\text{Г}}}}. \quad (7)$$



Эта величина учитывает влияние «газового» компонента. Для оценки вклада каждой составляющей определим отношение, используя уравнения (6) и (7),

$$\bar{\lambda}_{\text{ЭКВ}} = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}^{\text{М}}}{\lambda_{\text{ЭКВ}}^{\text{Г}}} = \lambda_{\text{М}}(1 - \Pi) \left/ \frac{\lambda_{\text{М}}}{(1 - \Pi) + \Pi(\lambda_{\text{М}}/\lambda_{\text{Г}})} \right. = \left[\Pi(\lambda_{\text{М}}/\lambda_{\text{Г}}) + (1 - \Pi) \right] (1 - \Pi). \quad (8)$$

Рассчитаем $\bar{\lambda}_{\text{ЭКВ}} = f(\Pi)$, приняв из практики $\lambda_{\text{М}} = 1.0 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{град}}$ (для шамота) и $\lambda_{\text{Г}} = 0.02 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{град}}$ (для воздуха). Тогда для расчетов уравнение (8) трансформируется в выражение

$$\bar{\lambda}_{\text{ЭКВ}} = \left(\Pi \frac{1.0}{0.02} + (1 - \Pi) \right) (1 - \Pi) = (49\Pi + 1)(1 - \Pi),$$

на основании которого построен график (рис. 4).

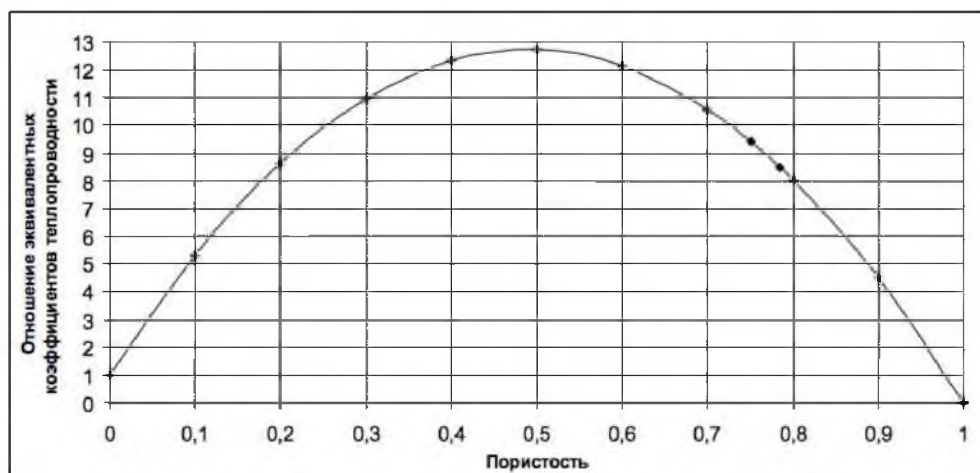


Рис. 4. Влияние пористости материала на отношение эквивалентных коэффициентов теплопроводности $\bar{\lambda}_{\text{ЭКВ}}$.

Предложенная гипотеза является общей для всех возможных материалов, что позволяет построить общую функцию $\Delta\bar{\lambda} = f(\Pi)$, при этом $\Delta\bar{\lambda} = \Delta\lambda/\Delta\lambda_{\text{ст}}$.

На основании литературных данных для огнеупоров [2], со свойствами, представленными в табл. 2, была построена обобщенная зависимость $\bar{\lambda} = f(\Pi)$ на основе методики аффинных преобразований (рис. 5). [1]

Для оценки адекватности полученных зависимостей и проверки правильности гипотезы была проведена экспериментальная проверка на комплексе ЛКТТ-2. Коэффициент теплопроводности для шамота-легковеса ШЛ-1,0 определялся методом плоской стенки. Результаты опытов представлены точкой на рис. 5, что позволяет судить о правильности предложенной гипотезы.



Таблица 2

Литературные данные по свойствам огнеупоров разных стран

№	Страна	Марка	ρ	Π	λ	1- Π	ρ_0	$\bar{\rho}_0$
1	Япония	LBK-20	0,47	0,83	0,13	0,17	2,764706	2,565985
2		LBK-23	0,51	0,81	0,14	0,19	2,684211	
3		A-2	0,46	0,80	0,13	0,20	2,30	
4		A-6K	0,68	0,75	0,18	0,25	2,72	
5		B-5H	0,85	0,64	0,2	0,36	2,361111	
6		C1-E	1,35	0,48	0,4	0,52	2,596154	
7		4-HB	1,42	0,44	0,47	0,56	2,535714	
8	США	K-16	0,35	-	0,18			
9		K-20	0,46	-	0,226			
10		K-23	0,50	-	0,226			
11		K-26	0,071	-	0,406			
12		ДЖМ-26	0,86	-	0,332			
13	Франция	Savoie di-20	0,44	-	0,18			2,566279
14		Savoie di-23	0,47	0,828	0,185	0,172	2,732558	
15		Savoie di-28	0,70	-	0,3			
16		Ref-750	0,72	0,70	0,36	0,30	2,40	

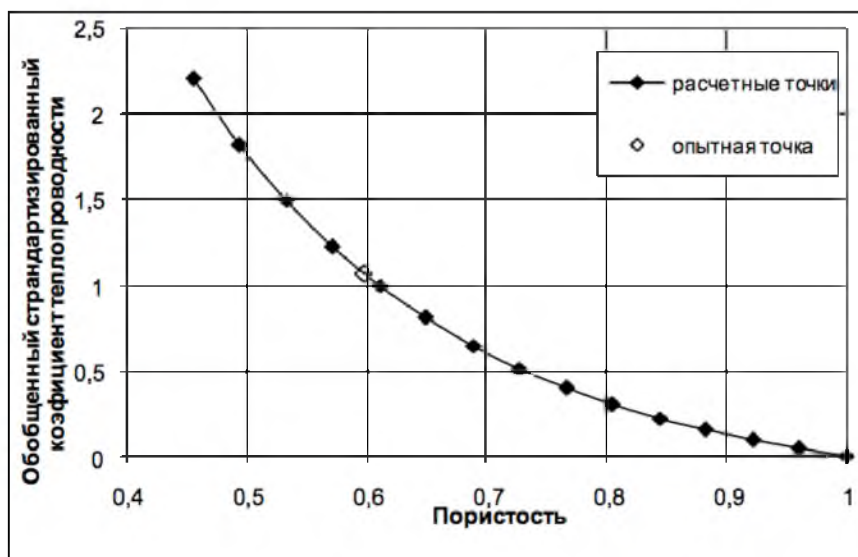


Рис. 5. Зависимость обобщенного стандартизированного коэффициента теплопроводности от пористости.



Выводы. Предложенная гипотеза влияния структуры пористого материала была подтверждена экспериментально, что в совокупности с ранее предложенной методикой получения обобщенной характеристики позволяет легко и точно определять коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов, используемых в теплотехнических агрегатах.

Литература

1. Стерлигов В.В., Чекулаев А.А. Создание обобщенной модели теплопроводности для тел с анизотропными свойствами // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2011. – №8. – С.45–48.
2. Стерлигов В.В., Михайличенко Т.А., Шадринцева Д.А. Создание обобщенной инженерной методики определения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов // Вестник СибГИУ. – 2012. – №2. – С.24–26.

HEAT OPERATION ENGINEERING MODEL OF THERMAL INSULATING MATERIALS

V.V. Sterligov, D.A. Shadrintseva

Siberian State Industrial University,
St. Kirov, 42, Novokuznetsk, 654000, Russia, e-mail: schadrintseva.darya@yandex.ru

Abstract. New approach to interpretation of the thermal conductivity coefficient of porous insulating materials is presented. Experiments data verified the proposed hypothesis.

Key words: refractories, porosity, conductivity, thermal insulation.