

УДК 536.24

А.М. Павленко, Е.Н. Сайко

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

Аннотация. В данной работе рассмотрено влияние структурных параметров на теплопроводность пористого материала. Предложены рекомендации для оценки влияния различных факторов на теплопроводность пористого материала.

Введение. В настоящее время исследования теплопроводности существенно неупорядоченных пористых структур остаются актуальными, что продиктовано широчайшим спектром применения таких материалов в определенном температурном диапазоне в промышленных целях.

При разработке новых материалов с набором заранее заданных теплофизических характеристик, необходимо исследовать закономерности формирования физико-механических свойств с учетом условий эксплуатации этих теплоизоляционных материалов. Поскольку пористые материалы имеют резко неоднородное строение, такие закономерности весьма сложны и недостаточно изучены. Таким образом, пористые теплоизоляционные материалы, как сложная гетерогенная структура, являются важным модельным объектом для установления фундаментальных закономерностей поведения неоднородных сред при действии высоких температур.

Постановка задачи. Пористые материалы представляют собой своеобразный класс неупорядоченных сред, особенности которых затрудняют применение традиционных методов описания структуры [1]. Исследование структуры таких материалов позволяет адекватно описать параметры строения, а также связать их с теплофизическими характеристиками. Широкий диапазон структурных и теплофизических свойств пористых материалов дает возможность использовать их в самых разнообразных условиях.

Сложность теоретического описания процесса переноса тепла в пористых структурах заключается не только в различных механизмах теплопереноса, но и в наличии двух фаз: собственно материала и газонаполненного порового пространства.

© Павленко А.М., Сайко Е.Н., 2010

Передача теплоты в пористых материалах осуществляется посредством:

кондуктивной теплопроводности твердого скелета (каркаса), образующего пористую структуру материала $\lambda_{\text{карк}}$;

кондуктивной теплопроводности газа $\lambda_{\text{г}}$, находящегося в ячейках пор;

излучения между стенками пор (радиационная теплопроводность) $\lambda_{\text{р}}$;

конвекции вследствие перемещения газа в порах материала $\lambda_{\text{к}}$.

Коэффициент теплопроводности пористого материала (эффективная теплопроводность) является суммарной характеристикой:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{карк}} + \lambda_{\text{г}} + \lambda_{\text{р}} + \lambda_{\text{к}} \quad (1)$$

Таким образом, эффективная теплопроводность пористого теплоизоляционного материала является сложной функцией, зависящей от многих факторов: температуры, давления газа в порах, пористости, размера пор, формы и упаковки пор, степени черноты стенок пор и др., оказывающих различное влияние на величину коэффициента теплопроводности.

Элементарные виды теплообмена не обособлены и в чистом виде не встречаются. Как правило, одновременно имеют место все виды теплообмена, поэтому количественная оценка вклада каждого из них в общую теплопередачу затруднена и доминирует при конкретных термодинамических условиях применения.

Необходимо проанализировать степень влияния каждого из потоков в общий тепловой поток, который передается через пористый материал. В связи с этим, актуальна задача определения данных параметров с целью применения конкретных материалов с набором заданных теплофизических свойств в определенных термодинамических условиях.

Результаты исследований. Конвективный теплообмен, возникающий в порах материала, протекает в ограниченном размерах пор и микрозазоров на стыке частиц пространстве. Ограниченность пространства препятствует возникновению конвективных токов газа, заполняющего поры, под действием температурного градиента. Таким образом, вследствие замкнутости объема пор материала и наличия восходящих и нисходящих потоков

сильно усложняются условия движения среды. Они зависят от геометрических размеров (диаметра пор), рода вещества, заполняющего поровое пространство, а также условий теплообмена.

Можно получить приближенное выражение для величины минимального температурного градиента β , необходимого для образования конвекционных токов в пористой среде [2]:

$$\beta = \frac{4\pi^2 \nu a}{kg\rho\beta_0 d^2} \quad (2)$$

где k и a – проницаемость и коэффициент температуропроводности среды, g – ускорение силы тяжести, ρ , ν , β_0 – плотность, кинематическая вязкость и коэффициент объемного температурного расширения газа, заполняющего поры, d – толщина исследуемого слоя материала.

Коэффициент конвекции ε_k является функцией критерия Релея [3]:

$$\varepsilon_k = f(Ra) \quad (3)$$

При малых значениях аргумента $Ra < 10^3$ (или $\lg Ra < 3$) значение функции $\varepsilon_k = 1$ ($\lg \varepsilon_k = 0$). Это означает, что при малых значениях Ra теплопередача в порах обуславливается только теплопроводностью воздуха. При значении $10^3 < Ra < 10^6$ коэффициент конвекции

$$\varepsilon_k = 0,105 Ra^{0,3} \quad (4)$$

При значении $10^6 < Ra < 10^{10}$ коэффициент конвекции

$$\varepsilon_k = 0,40 Ra^{0,2} \quad (5)$$

Принимая диапазон значений диаметра закрытой поры от 0,5 мм до 3,0 мм, перепад температур на границах поры до 20 °С (максимальный для закрытой поры), определим наличие конвекционных токов в закрытой поре в диапазоне температур -110 °С ...+1000 °С.

На рисунке 1 показаны результаты зависимости коэффициента конвекции от температуры при изменении диаметра пор закрытой поры. Из графика видно, что начало возникновения конвекции имеет место при диаметре поры, составляющем 3 мм и наличии перепада температур, равного 20 °С, но исключительно в диапазоне температур -110 °С...-105 °С. При дальнейшем возрастании температуры возникновение конвекционных токов не наблюдается.

Принимая диапазон значений диаметра открытой поры от 9,0 мм до 20,0 мм, перепад температур на границах поры до 100 °С (максимальный для открытой поры), определим наличие конвекционных токов в открытой поре в диапазоне температур -110 °С ...+1000 °С. На рисунке 2 показаны результаты зависимости коэффициента конвекции от температуры при изменении диаметра пор открытой поры.

Из результатов расчетов, представленных на рисунке 2 видно, что в воздушных порах диаметром от 9,0 мм до 20,0 мм при наличии в поре перепада температур, возрастающего от 40°С до 100 °С, в исследованном интервале температур наблюдается наличие конвекционных токов. Для поры диаметром 9,0 мм при минимальном перепаде температур 40°С конвекция возникает в интервале температур от -110 °С до 100 °С. Дальнейшее возрастание температуры не приводит к возникновению конвективного тока. Для данной поры при перепаде температур 100°С конвекция возникает в интервале температур от -110 °С до 190 °С. Для поры диаметром 20,0 мм при минимальном перепаде температур 40°С конвекция возникает в интервале температур от -110 °С до 370 °С. Для данной поры при перепаде температур 100°С конвекция возникает в интервале температур от -110°С до 530 °С. При дальнейшем возрастании температуры возникновение конвекционных токов не наблюдается.

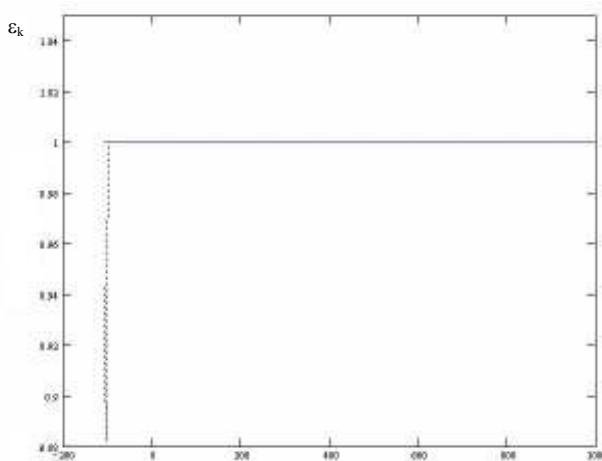


Рисунок 1 - Зависимость коэффициента конвекции от температуры для закрытой поры

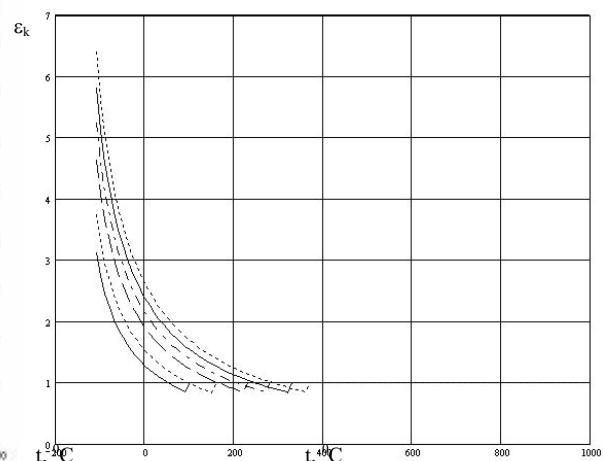


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента конвекции от температуры для открытой поры

Анализируя характер кривых зависимости коэффициента конвекции ϵ_k от температуры (рис. 1 и рис. 2), можно сделать вывод,

что при приближении к температуре, при которой конвективный ток прекращается, происходит небольшой рост коэффициента конвекции (кривая имеет некоторый «скачок») от минимально возможной величины (при определенном температурном перепаде в поре) к $\varepsilon k=1$. С увеличением температуры происходит снижение интенсивности теплопередачи путем конвекции, что можно объяснить взаимными помехами в движении поднимающихся и опускающихся потоков воздуха (влияние внутреннего трения воздуха о частицы), вследствие ограниченности пространства.

Влияние степени замкнутости пор на теплопроводность дисперсных материалов неоднозначно. При отрицательных, нормальных и повышенных температурах оно проявляется по разному. Кинематическая вязкость воздуха в пределах температур от +330 0С до -110 0С уменьшается в 13,2 раза. Воздух становится более текучим. В результате конвекция его внутри пористого материала возрастает. Поэтому для тепловой изоляции сооружений и оборудования, эксплуатируемого при отрицательной температуре, предпочтительны материалы с мелкой замкнутой ячеистой структурой. При невысоких положительных температурах воздух расширяется и в случае открытой пористости частично вытесняется из материала. Поэтому для ограждающих конструкций, работающих при невысокой положительной температуре, целесообразно применять материалы с равномерно распределенной открытой пористостью.

Вопрос о роли излучения в общей теплопередаче дисперсных систем оказывается наиболее сложным. На основании определения радиационного коэффициента теплопроводности λ_p имеем [4]:

$$\lambda_p = 2\varepsilon^2\sigma T^3h \quad (6)$$

где ε - степень черноты поверхности поры; σ - постоянная Стефана-Больцмана; T – температура; h – толщина газовой прослойки.

Исходя из формулы (6), тепловой радиационный поток можно снизить как за счет уменьшения степени черноты поверхности поры, так и за счет уменьшения толщины газовой прослойки (при этом преимущественным параметром является уменьшение поверхности излучения и перепада температуры).

На рисунке 3 и рисунке 4 представим зависимость коэффициента лучистой теплопроводности от температуры при различных диаметрах пор и степени черноты поверхности поры.

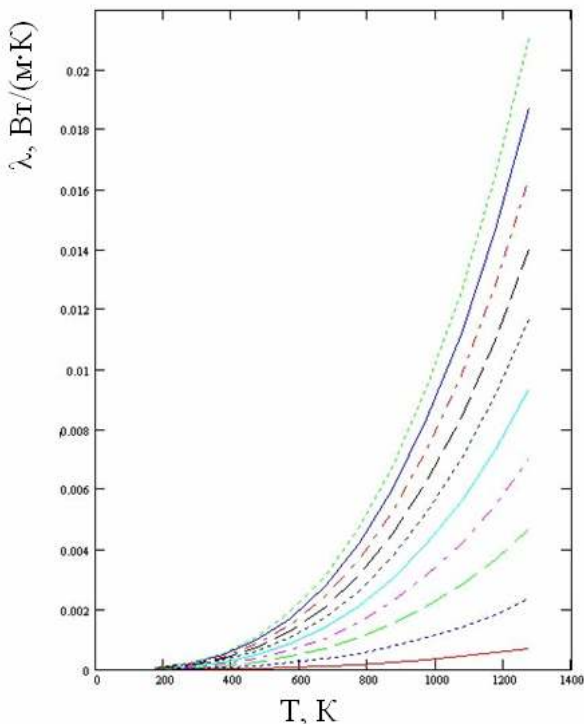


Рисунок 3 - Зависимость коэффициента лучистой теплопроводности от температуры при $\varepsilon = 0,1$

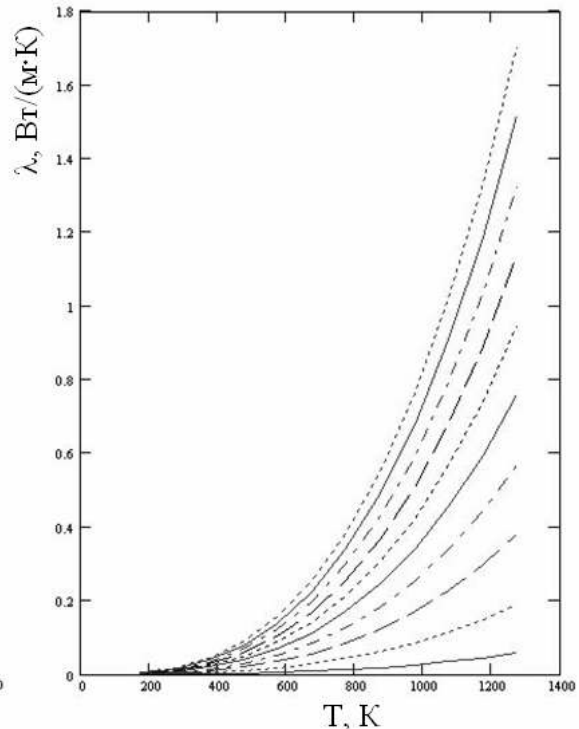


Рисунок 4 - Зависимость коэффициента лучистой теплопроводности от температуры при $\varepsilon = 0,9$

Из графиков, представленных на рис. 3 и рис. 4 видно, что степень черноты поверхности поры оказывает существенное влияние на коэффициент лучистой теплопроводности.

Приведенный расчет зависимости коэффициента радиационной теплопроводности от температуры и степени дисперсности системы показал, что при низких температурах излучение мало влияет на общий процесс теплообмена. Уже при $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в материале с порами размером 1 мм роль излучения усиливается и достигает заметного значения при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Анализ графиков дает основание считать, что при высоких температурах излучение возрастает особенно сильно. Крайне интенсивный рост радиационной теплопроводности в дисперсном объекте достигается при увеличении температуры до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Выводы. Теплопередача в ячейке (поре) представляет собой сложный комплексный процесс. Рассматривая долю конвективной составляющей передачи тепла в общей теплопередаче в порах дисперсного материала, можно заключить, что конвекция преобладает над лучистым теплопереносом в области температур t

=+25 °С и умеренных температур порядка и ниже 100 °С. С учетом того, что состав переходит во вспученное состояние в диапазоне $t = 500-800$ °С, а применяется как теплоизолирующий материал в диапазоне до 1000 °С, вклад отдельных составляющих (конвекция, излучение, теплопроводность) в общий теплоперенос зависит от температурных условий, при которых применяется данный материал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляков В.В. , Головин А.В. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 11. С. 54-57.
2. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов, Москва, 1962 г., 456 с.
3. Васильев Л.Л., Танаева А.С. Теплофизические свойства пористых материалов. Минск, 1971., 265 с.
4. Белов С.В. Пористые проницаемые материалы. М.: Металлургия, 1987. – 335 с.

Получено 29.01.2010г.