

Чейлытко А. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОР НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Рассматривается возможность улучшения теплофизических свойств теплоизоляционного материала на этапе производства путем регулирования пористости. Приводится сравнение различных схем расположения пор в теплоизоляционных материалах на основе ранее полученных расчетов и экспериментов. Рекомендуется наиболее оптимальная структура строения пористого теплоизоляционного материала.

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности, пористость, структура материала, теплоотдача, теплоизоляционный материал, тепловое сопротивление.

1. Введение

Наиболее распространенным случаем использования пористых материалов в технической энергетике является тепловая изоляция. А наиболее интересными для рассмотрения в качестве примера крупнопористыми материалами являются материалы, полученные путем вспучивания сырьевой массы, так как знание процессов теплообмена в них позволяет регулировать их конечные теплофизические характеристики. К таким материалам относятся пенополистирольные материалы, газобетоны, некоторые высокоогнеупорные материалы, пеностекло, керамзит и т. д.

2. Постановка проблемы

При подробном рассмотрении технологии получения любого из данных материалов можно сделать вывод, что существует зависимость между теплофизическими свойствами пористого материала и режимов его вспучивания. Так, в работах [1–10] приводятся зависимости теплофизических свойств определенного материала от режимов вспучивания (время термической обработки, температура внешней среды, начальная влажность сырьевой смеси), которые позволяют управлять конечными теплофизическими характеристиками материала при его производстве, меняя конечную пористость. Это подтверждает, что не только химический состав материала влияет на его теплофизические свойства, но и огромное влияние имеет количественные и качественные показатели пористости материала.

В работе [1] сделан вывод о том, что не только значение пористости влияет на теплофизические характеристики материала, но и распределение пористости по объему.

3. Анализ основных исследований и публикаций по данной проблеме

Экспериментальные данные, как исследовательские, так и производственные, по оптимальным условиям вспучивания также различны, так как нет теории обобщающей физические процессы, происходящие при формировании пористости. К примеру, подогрев вспучивающейся исходной смеси пеностекла до температуры спекания (690 °С) рекомендуют проводить как 70 минут, так и 15 минут [2].

Все это доказывает, что пористость материала играет существенную роль в теплофизических характеристиках материала. С увеличением размера пор увеличивается проводимость тепла за счет конвекции. Аналогичное действие оказывает и увеличение размера поры на лучистую составляющую.

4. Результаты исследований

Рассмотрим подробнее влияние расположения пор на теплопроводность материала. В табл. 1 приняты следующие обозначения: p – пористость, λ_1 – коэффициент теплопроводности материала (в качестве примера выбран кремнеземистый материал с коэффициентом теплопроводности 0,12 Вт/(м·К)), λ_2 – коэффициент теплопроводности среды (в качестве примера выбран воздух с примесями газов имеющий коэффициент теплопроводности 0,019 Вт/(м·К)). Тепловой поток направлен снизу вверх. Черным цветом обозначен материал.

К расчету коэффициента теплопроводности засыпок (№ 8 и № 9 в табл. 1) также относится формула выведенная Эйкенем [3]

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{\lambda_1 + 1 + \frac{2p \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)}{2\lambda_1 - 1}}{1 - p \frac{\frac{\lambda_1}{\lambda_2}}{2\lambda_1 + 1}}$$

и формула Торкара [4]

$$\lambda_{\text{эф}} = \frac{\lambda_1}{1 - p}$$

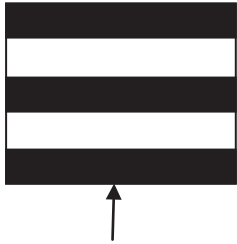
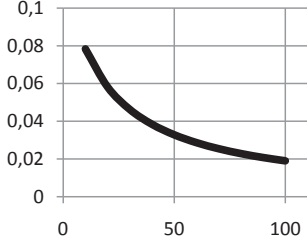
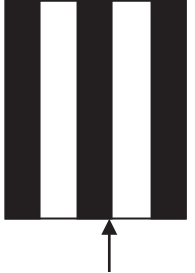
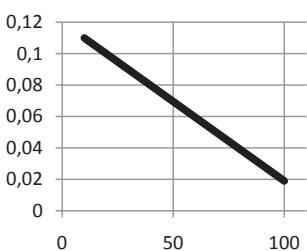
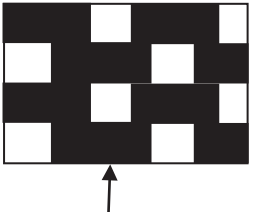
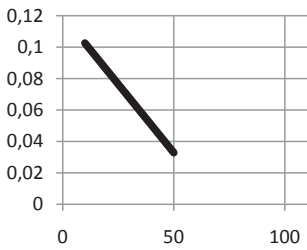
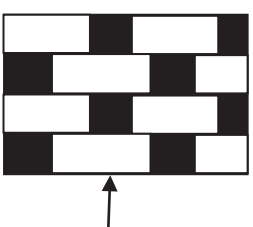
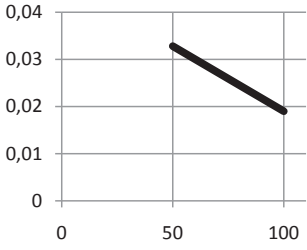
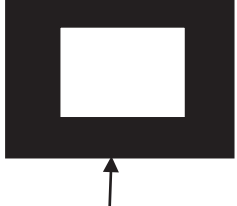
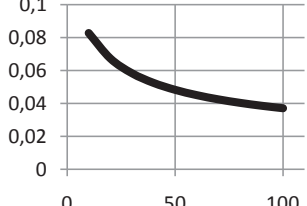
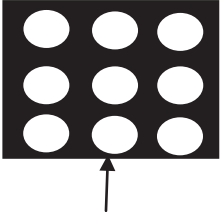
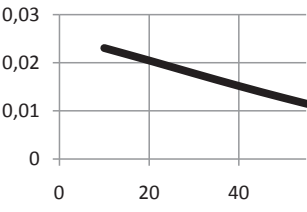
Формула Эйкена дает наименьшую ошибку при форме частиц приближающимся к сфере и при пористости менее 50 %. Для засыпки из дисперсного материала наиболее подходит случай № 9 из табл. 1.

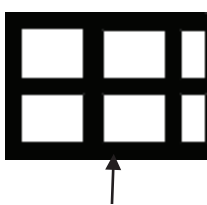
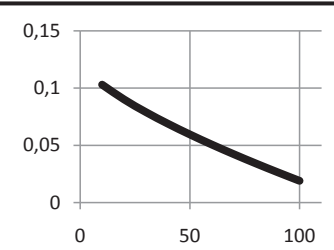
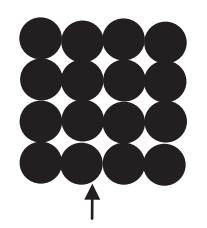
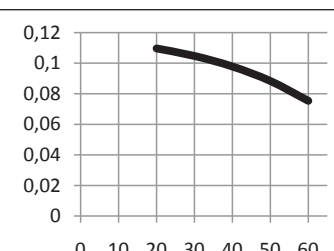
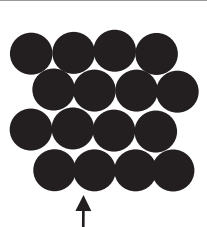
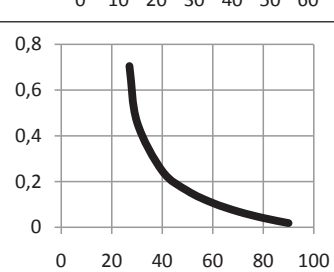
Для засыпок из зернистых кремнеземистых материалов рекомендуется использовать формулу Оделевского [3]

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_1 \left(1 + \frac{p_1}{\frac{1 - p_2}{3} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}} \right)$$

Таблица 1

Сводка зависимостей коэффициента теплопроводности от пористости для двухфазных систем [3—10]

№ п/п	Схема расположения пор	Формула для расчета эффективного коэффициента теплопроводности	Пример $\lambda_{эф} = f(p)$
1		$\lambda_{эф} = \lambda_2 \frac{100}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}(100-p) + p}$	
2		$\lambda_{эф} = \lambda_1 \frac{100-p}{100} + \lambda_2 \frac{p}{100}$	
3		<p>при $p \leq 50\%$</p> $\lambda_{эф} = \lambda_2 \left[\frac{4p}{1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1-2p) \right]$	
4		<p>при $p \geq 50\%$</p> $\lambda_{эф} = \lambda_2 \left[\frac{4(1-p)}{1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} + (2p-1) \right]$	
5		$\lambda_{эф} = \frac{\lambda_1^2 p^{\frac{2}{3}} + \lambda_1(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_1 + (p^{\frac{2}{3}})(\lambda_2 - \lambda_1)}$	
6		<p>при $p \leq 50\%$</p> $\lambda_{эф} = \frac{\lambda_2 p + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} (1 - p^{\frac{2}{3}})}{p - p^{\frac{2}{3}} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - p^{\frac{2}{3}} + p)}$	

№ п/п	Схема расположения пор	Формула для расчета эффективного коэффициента теплопроводности	Пример $\lambda_{эф} = f(p)$
7		$\lambda_{эф} = \lambda_2 p^{\frac{1}{3}} + \lambda_1 (1 - p)^{\frac{2}{3}}$	
8		$p \approx 48\%$ $\lambda_{эф} = \frac{1,5\pi\lambda_1(0,9 - p)}{(2,1 - p)^2}$	
9		$p \approx 30\%$ $\lambda_{эф} = 3\pi\lambda_1 \ln \frac{43 + 0,31p}{p - 26}$	

По табл. 1 проведем графический анализ формул для расчета коэффициента теплопроводности пористых материалов (рис. 1) и отдельно для засыпки (рис. 2). При этом для пористого материала оставим те же значения теплопроводности, что и в примере, а для засыпки из твердой фазы примем теплопроводность равную гранулам теплоизоляционного материала на основе кремнезема для среднетемпературной изоляции (0,036 Вт/(м · К)) [1].

учетом влияния конвективной составляющей, но и контактным термическим сопротивлением, которое у структуры № 2 отсутствует. Структура № 7 является также непригодной для теплоизоляционных материалов, так как в ней присутствуют стоки тепла без контактного сопротивления. В структуре № 5 не учтено влияние размера пор, а точнее она рассматривалась автором как структура больших размеров. Также противоречит логике заниженные значения теплопроводности у № 5 при пористости до 30 %.

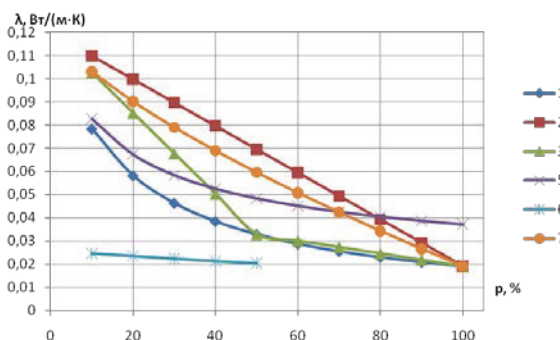


Рис. 1. Влияние пористости на эффективный коэффициент теплопроводности для различных схем пористости по табл. 1

Как видно из рис. 1 структура № 6 является оптимальной для теплоизолирующего материала, хотя логично предположить, что при пористости 10 % коэффициент теплопроводности материала не может быть примерно равен коэффициенту теплопроводности воздуха. Поэтому расчетная формула № 6 является не верной, а минимальный коэффициент теплопроводности (теоретический) достигается у структуры № 1.

Максимальный коэффициент теплопроводности наблюдается у структуры № 2. Это объясняется не только

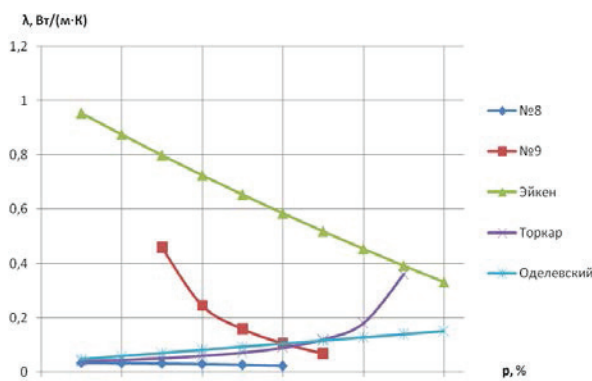


Рис. 2. Влияние пористости на эффективный коэффициент теплопроводности для засыпок из дисперсного материала по табл. 1

Как видно из рис. 2 формула Эйкена и Богомолва (№ 9 табл. 1) показывает лишь общую зависимость и нуждается в эмпирической корректировке. Зависимости Торкара и Оделевского выражают увеличение коэффициента теплопроводности при увеличении пористости и годятся только для влажных дисперсных

систем или систем с большим размером пор. Наиболее приемлемой является зависимость Некрасова для идеализированной структуры (№ 8 табл. 1).

5. Вывод

Наиболее приближенной к минимально теплопроводящей (теоретической) структуре является шахматное расположение вытянутых перпендикулярно тепловому потоку пор по объему. Это подтверждается также и экспериментальными исследованиями [1].

Проанализировав рис. 2 можно сделать вывод, что для идеализированного случая засыпки с общей пористостью около 50 % эффективный коэффициент теплопроводности можно рассчитать с помощью зависимости Некрасова (№ 8 табл. 1). Для практических расчетов (пористость дисперсной системы около 30 %) — необходимо эмпирическими коэффициентами скорректировать зависимость Богомолова (№ 9 табл. 1).

Литература

1. Чейлытко, А. А. Экспериментальные исследования теплофизических характеристик пористого дисперсного материала в зависимости от различных режимов термообработки [Текст] / А. А. Чейлытко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2009. — № 5/6(41). — С. 4–7.
2. Демидович, Б. К. Производство и применение пеностекла [Текст] / Б. К. Демидович. — Минск : Наука и техника, 1972. — 304 с.
3. Чудновский, А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов [Текст] / А. Ф. Чудновский. — М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. — 456 с.
4. Torkar, K. Oster. Chem. Zt. [Text] / K. Torkar. — 1952. — № 53. — 160.
5. Бернштейн, Р. С. Исследование процессов горения натурального топлива [Текст] / Р. С. Бернштейн. — М. : Госэнергоиздат, 1948.
6. Старостин, Д. Ф. Отопление и вентиляция [Текст] / Д. Ф. Старостин. — № 3. — 1935.
7. Russel, H. W. Journal of the American Ceramic Society [Text] / H. W. Russel. — № 18. — 1935. — pp. 1–5.
8. Ribaud, M. Challur et industrie [Text] / M. Ribaud. — 1937. — № 201.
9. Некрасов, А. А. ЖТФ [Текст] / А. А. Некрасов. — 1940. — № 2.
10. Богомолов, В. З. Труды АФИ [Текст] / В. З. Богомолов. — № 3. — М. : Сельхозгиз, 1941.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОР НА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ

Розглядається можливість покращення теплофізичних властивостей теплоізоляційного матеріалу на етапі виробництва шляхом регулювання пористості. Приводиться порівняння різних схем розташування пор в теплоізоляційних матеріалах на основі раніше отриманих розрахунків і експериментів. Рекомендується найбільш оптимальна структура будови пористого теплоізоляційного матеріалу.

Ключеві слова: коефіцієнт теплопровідності, пористість, структура матеріалу, тепловіддача, теплоізоляційний матеріал, тепловий опір.

Чейлытко Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики, Запорожская государственная инженерная академия, e-mail: cheylitko@ya.ru.

Чейлытко Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики, Запорізька державна інженерна академія.

Cheylitko Andrey, Zaporizhzhya State Engineering Academy, e-mail: cheylitko@ya.ru