

Е.В. Алексеев^{1,2*}, Ю.П. Заричняк¹, С.А. Белегенова², В.П. Ходунков³

¹Университет ИТМО, Российская Федерация, г.Санкт-Петербург

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г.Алматы

³ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Российская Федерация, г.Санкт-Петербург

*e-mail: evgeniialekseev1996@mail.ru

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПОЛЫХ МИКРОСФЕР С ПЕРФОРИРОВАННЫМИ СТЕНКАМИ

Одним из основных направлений научных исследований в области материалов является изучение теплофизических свойств композиционных материалов и неоднородных систем. Понимание этих свойств и разработка аналитических методов прогнозирования необходимы для создания материалов с требуемыми свойствами. Впервые исследуется теплопроводность полых микросфер с перфорированными стенками как необходимого компонента перспективных новых композитов. Целью данной работы является оценка возможности анализа эффективной теплопроводности полых перфорированных микросфер ещё на этапе их разработки. Получены соотношения для аналитической оценки (расчёта/прогноза) эффективной теплопроводности полых микросфер с различным материалом стенок, видами газа в порах (воздуха или иных газов) и относительной площади перфорации стенок полых микросфер. Для расчёта теплопроводности объекта используются модели и методы теории обобщенной проводимости. Представлены результаты аналитического расчета значений эффективной теплопроводности микросфер из Al_2O_3 , ZrO_2 , диэтилполисилоксана, наполненных воздухом, в зависимости от относительной толщины стенки микросферы и относительной площади перфорации стенок при фиксированных значениях температур. Результаты работы могут быть использованы для прогнозирования свойств новых композиционных материалов в заранее заданном диапазоне температур.

Ключевые слова: полые микросферы, перфорированные стенки, теплопроводность, теория обобщенной проводимости, композиционные материалы.

Е.В. Алексеев^{1,2*}, Ю.П.Заричняк¹, С.А. Белегенова², В.П.Ходунков³

¹ИТМО университеті, Ресей Федерациясы, Санкт-Петербург қ.

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

³Д.И. Менделеев атындағы ВНИИМ, Ресей Федерациясы, Санкт-Петербург қ.

* e-mail: evgeniialekseev1996@mail.ru

Перфорацияланған қабырғалары бар қуыс микросфералардың жылу өткізгіштігі

Материалдар саласындағы ғылыми зерттеулердің негізгі бағыттарының бірі композициялық материалдар мен гетерогенді жүйелердің жылу-физикалық қасиеттерін зерттеу болып табылады. Осы қасиеттерді түсіну және аналитикалық болжау әдістерін әзірлеу қажетті қасиеттері бар материалдарды жасау үшін өте маңызды. Перфорацияланған қабырғалары бар қуыс микросфералардың жылу өткізгіштігі перспективалы жаңа Композиттердің қажетті құрамдас бөлігі ретінде алғаш рет зерттелуде. Бұл жұмыстың мақсаты-қуыс перфорацияланған микросфералардың тиімді жылу өткізгіштігін оларды әзірлеу кезеңінде де талдау мүмкіндігін бағалау. Қабырғалардың әртүрлі материалдары бар қуыс микросфералардың тиімді жылу өткізгіштігін, кеуектердегі газ түрлерін (ауа немесе басқа газдар) және қуыс микросфералар қабырғаларының перфорациясының салыстырмалы ауданын аналитикалық бағалау (есептеу/болжау) үшін қатынастар алынды. Объектінің жылу өткізгіштігін есептеу үшін жалпыланған өткізгіштік теориясының модельдері мен әдістері қолданылады. Микросфера қабырғасының салыстырмалы қалыңдығына және бекітілген температура мәндеріндегі қабырға перфорациясының салыстырмалы ауданына байланысты ауамен толтырылған Al_2O_3 , ZrO_2 , диэтилполисилоксаннан алынған микросфералардың тиімді жылу өткізгіштігінің мәндерін аналитикалық есептеу нәтижелері келтірілген. Жұмыс нәтижелерін алдын ала белгіленген температура диапазонында жаңа композициялық материалдардың қасиеттерін болжау үшін пайдалануға болады.

Түйін сөздер: қуыс микросфералар, перфорацияланған қабырғалар, жылу өткізгіштік, жалпыланған өткізгіштік теориясы, композициялық материалдар.

E.V. Alekseev^{1,2*}, Y.P. Zarichnyak¹, S.A. Bolegenova², V.P. Khodunkov³

¹ITMO University, Russian Federation, Saint Petersburg

²Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

³D.I.Mendeleev VNIIM, Russian Federation, Saint Petersburg

*e-mail: evgenialekseev1996@mail.ru

Thermal conductivity of hollow microspheres with perforated walls

One of the main directions of scientific research in the field of materials is the study of the thermophysical properties of composite materials and heterogeneous systems. Understanding these properties and developing analytical forecasting methods are necessary to create materials with the required properties. For the first time, the thermal conductivity of hollow microspheres with perforated walls is investigated as a necessary component of promising new composites. The purpose of this work is to evaluate the possibility of analyzing the effective thermal conductivity of hollow perforated microspheres at the stage of their development. The relations for the analytical evaluation (calculation/forecast) of the effective thermal conductivity of hollow microspheres with different wall materials, types of gas in the pores (air or other gases) and the relative perforation area of the walls of hollow microspheres are obtained. To calculate the thermal conductivity of an object, models and methods of the theory of generalized conductivity are used. The results of the analytical calculation of the values of the effective thermal conductivity of microspheres made of Al₂O₃, ZrO₂, diethylpolysiloxane filled with air, depending on the relative thickness of the microsphere wall and the relative perforation area of the walls at fixed temperatures are presented. The results of the work can be used to predict the properties of new composite materials in a predetermined temperature range.

Keywords: hollow microspheres, perforated walls, thermal conductivity, theory of generalized conductivity, composite materials.

Введение

Необходимость изучения теплофизических свойств композиционных материалов и неоднородных систем, в том числе и разработка аналитических методов прогнозирования, является важной частью крупной научно-технической проблемы создания материалов с заранее заданными (требуемыми) свойствами.

Объектом исследования являются полые микросферы с перфорированными стенками (пористые микросферы), представленные на

рисунке 1 [1]. Перфорированные сферы имеют диаметр от 10 мкм до 250 мкм, толщину стенок от 1-2 мкм (тонкостенные) до 0.7-0.8 радиуса сферы (толстостенные) и размер отверстий в стенках от 5 до 60 мкм, с пористостью 30-75%.

Микросферы характеризуются малой плотностью в сочетании с высокой механической прочностью и твердостью, относительно низкой теплопроводностью, хорошей текучестью при свободной засыпке, а также электроизоляционными свойствами.

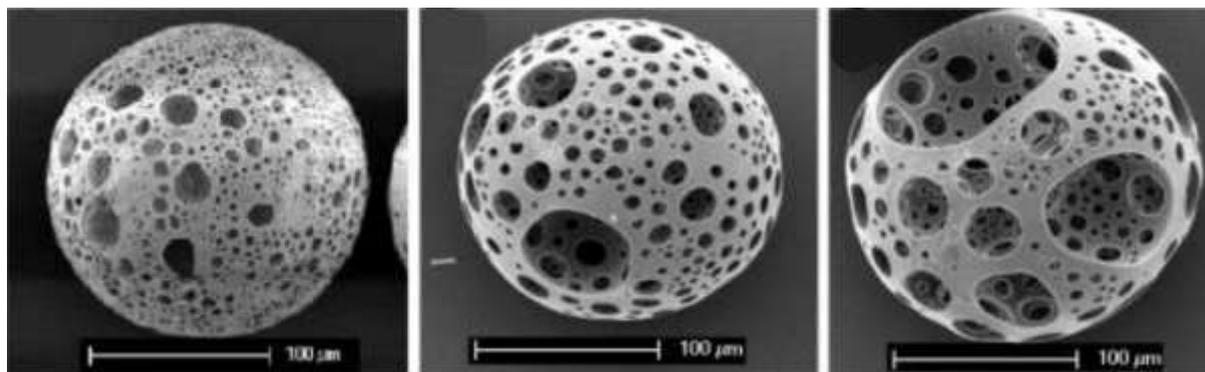


Рисунок 1— Электронные фотографии реальных полых микросфер с перфорированными стенками [1]

Пористые микросферы в медицине исследуются для доставки лекарства [2], стволовых клеток [3,4], тканевой инженерии [5]. Также пористые микрочастицы были исследованы для применения в качестве связующего звена между ассиметричными мембранами со слоистой структурой [6], в суперконденсаторах для повышения напряжения и плотности энергии [7] и в качестве анодных материалов для литий-ионных аккумуляторов [8].

В строительной индустрии и теплоэнергетике полые микросферы с цельными или перфорированными стенками используются как компоненты конструкционных и теплоизоляционных материалов. В работе [9], где проводится анализ структуры зольных микросфер с цельными и перфорированными стенками, указывается, что теплопроводность композитов с перфорированными стенками микросфер ниже, чем у материалов с неперфорированными стенками микросфер

Наиболее часто используемыми материалами для пористых микросфер являются неорганические материалы, такие как карбонат кальция (CaCO_3), фосфаты, бораты, силикаты, мезопористый кремнезем, гидроксипатит [10-12]

В работе [13] производится расчет теплопроводности композита из полимерных красок и стеклянных микросфер по классическим моделям теплопереноса в пористых средах – приближения взаимопроникающих континуумов на основе модели пластин, ориентированных параллельно и перпендикулярно тепловому потоку соответственно. При использовании покрытия достигается уменьшение теплового потока на 30–40 % при толщине покрытия 2–3 мм и снижение температуры поверхности трубы на 20 °С. Энергосберегающие свойства такого композиционного материала перспективны при его нанесении на поверхность объектов с низким тепловым сопротивлением.

В работе [14] экспериментально показано, что добавление полых вакуумированных микросфер из оксида кремния SiO_2 , покрытых натриевой известью, в полиуретановую матрицу снижает теплопроводность этого теплоизоляционного материала примерно на 27%. При этом заметного изменения тепловых характеристик не проявляется и через три месяца эксплуатации, позволяя предположить, что микросферы могут поддерживать внутренний вакуум в течение длительного периода времени.

В сухом состоянии теплопроводность композитов, наполненных тоностенными стеклянными полыми микросферами, составляет $-\lambda = 0,117 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, наполненных вспученным

вермикулитовым песком $-\lambda = 0,141 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, наполненных вспученным перлитовым песком $-\lambda = 0,156 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, наполненных зольными микросферами $-\lambda = 0,172 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ [15]. Приведенные в статье данные доказывают более высокую эффективность применения полых стеклянных микросфер в теплоизоляционных штукатурных растворах.

Обычно экспериментальные исследования физических свойств материалов проводятся уже после их создания. Но зачастую реальные условия требуют оценки возможности создания композиционного материала с заранее заданными свойствами ещё на этапе разработки требований будущих потребителей к новым конструкционным и теплоизоляционным материалам. Это делает актуальной задачу разработки моделей возможных структур и методов аналитической оценки возможности создания композиционных материалов с требуемыми свойствами.

Целью данной работы является оценка возможности анализа эффективной теплопроводности полых перфорированных микросфер ещё на этапе их разработки, так как ни в одном из известных нам источников не исследуется теплопроводность этих объектов как необходимого компонента перспективных новых композитов.

Материалы и методы

Для расчёта теплопроводности объекта используются модели и методы теории обобщенной проводимости [16-18]. Основная идея теории заключается в том, что эффективные коэффициенты обобщенной проводимости систем с хаотической или упорядоченной структурой можно считать равными, если эти структуры адекватны и свойства составляющих компонент сохраняются.

Произведем замену микросферы произвольной формы на кубы равного им объема, пористости и относительной площади перфорации стенок. (Рисунок 2а). Так как для расчета эффективной теплопроводности важно не само наличие перфорации в стенках, а соотношение площадей перфорированной доли стенок к сплошной (относительная площадь перфорации), то можно продолжить анализ процесса переноса тепла на модели куба с одним отверстием (рисунок 2б), относительная площадь перфорации и пористость которого будет равна относительной площади перфорации стенок и пористости куба с множеством отверстий в стенках, показанного на рисунке 2а.

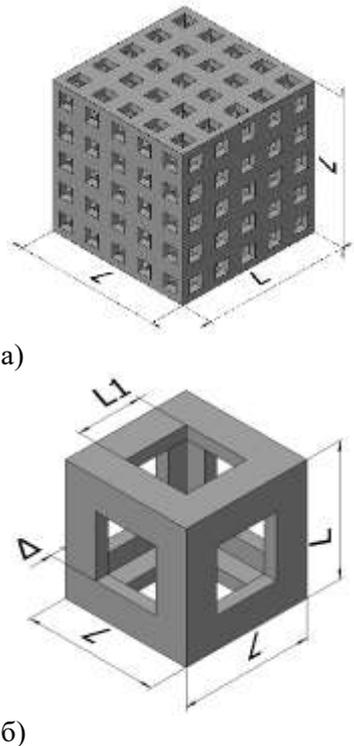


Рисунок 2 – Элементарные ячейки структуры в виде кубов

Первоначально проведём разбиение элементарной ячейки адиабатическими плоскостями, параллельными направлению потока тепла, на характерные участки 1-7, показанные на рисунке 3. Каждый участок характеризуется тепловым сопротивлением, схема соединения которых также представлена на рисунке. По формуле для плоской стенки (1) вычисляем тепловые сопротивления $R_1 - R_7$ для участков 1-7:

$$R = \frac{l}{S \cdot \lambda}, \quad (1)$$

где l – толщина стенки, S – площадь поперечного сечения стенки, λ – теплопроводность стенки.

$$R_1 = \frac{\Delta}{((L - 2 \cdot \Delta)^2 - L_1^2) \cdot \lambda_1},$$

$$R_2 = \frac{\Delta}{L_1^2 \cdot \lambda_2},$$

$$R_3 = \frac{L - 2 \cdot \Delta}{(L - 2 \cdot \Delta)^2 \cdot \lambda_2},$$

$$R_4 = \frac{\frac{L - L_1}{2}}{(L^2 - (L - 2 \cdot \Delta)^2) \cdot \lambda_1},$$

$$R_5 = \frac{\frac{L - L_1}{2}}{(L - 2 \cdot \Delta)^2 \cdot \lambda_2},$$

$$R_6 = \frac{L_1}{(L^2 - 4 \cdot L_1 \cdot \Delta - (L - 2 \cdot \Delta)^2) \cdot \lambda_1},$$

$$R_7 = \frac{L_1}{((L - 2 \cdot \Delta)^2 + 4 \cdot L_1 \cdot \Delta) \cdot \lambda_2},$$

где λ_1 – теплопроводность материала стенок, λ_2 – теплопроводность газа или жидкости в полости куба или в порах в стенках, L – длина стороны куба, L_1 – длина стороны отверстия, Δ – толщина стенки куба.

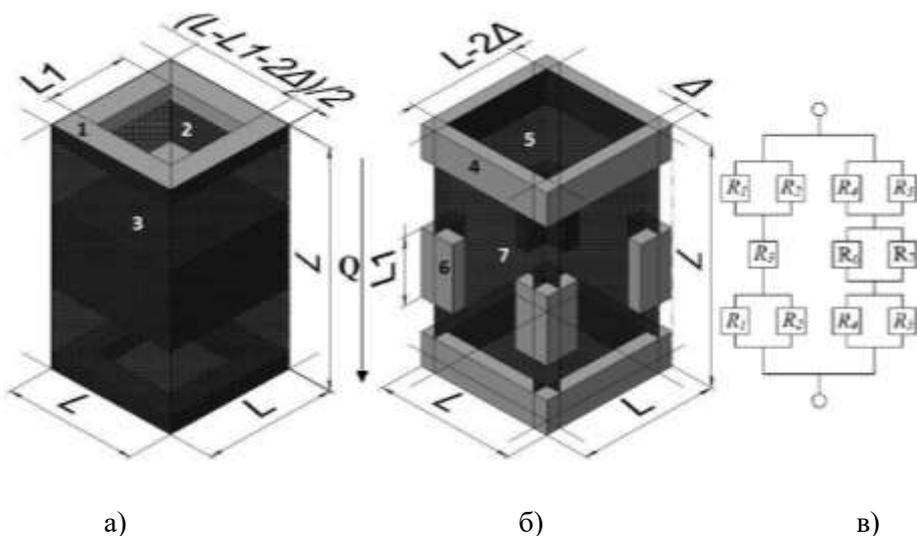


Рисунок 3 – Разбиение модели адиабатическими плоскостями параллельными направлению потока тепла Q и схема соединения тепловых сопротивлений отдельных участков модели

В соответствии со схемой соединения тепловых сопротивлений участков 1-7 на рисунке 3в выразим полное тепловое сопротивление модели $R_{\Sigma ад.}$ при разбиении её адиабатическими плоскостями, параллельными направлению теплового потока:

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

$$\frac{1}{R_{45}} = \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5},$$

$$\frac{1}{R_{67}} = \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7}.$$

$$\lambda_{эфф.ад.} = \frac{1}{\frac{\delta}{((1-\delta)^2 - S^2) \cdot \lambda_1 + S^2 \cdot \lambda_2} + \frac{1}{(1-\delta) \cdot \lambda_2}} + \frac{1}{\frac{1-S}{(1-(1-\delta)^2) \cdot \lambda_1 + (1-\delta) \cdot \lambda_2} + \frac{S}{(1-2 \cdot S \cdot \delta - (1-\delta)^2) \cdot \lambda_1 + ((1-\delta)^2 + 2 \cdot S \cdot \delta) \cdot \lambda_2}}, \quad (4)$$

где $\delta = 2\Delta/L$ – относительная толщина стенки, $S = L_1^2/L^2$ – относительная площадь перфорации.

Выразим тепловые сопротивления участков:

$$R_1 = \frac{\Delta}{(L^2 - L_1^2) \cdot \lambda_1},$$

$$R_2 = \frac{\Delta}{L_1^2 \cdot \lambda_2},$$

$$R_3 = \frac{L - 2 \cdot \Delta - L_1}{2 \cdot (L^2 - (L - 2 \cdot \Delta)^2) \cdot \lambda_1},$$

$$R_4 = \frac{L - 2 \cdot \Delta - L_1}{(L - 2 \cdot \Delta)^2 \cdot \lambda_2},$$

$$R_5 = \frac{L_1}{(L^2 - 4 \cdot L_1 \cdot \Delta - (L - 2 \cdot \Delta)^2) \cdot \lambda_1},$$

Суммарная проводимость элементарной ячейки:

$$\frac{1}{R_{\Sigma ад.}} = \frac{1}{2 \cdot R_{12} + R_3} + \frac{1}{2 \cdot R_{45} + R_6}. \quad (2)$$

Но тепловое сопротивление модели можно вычислить считая, что весь объём куба заполнен однородным веществом с эффективной теплопроводностью $\lambda_{эфф.ад.}$:

$$R_{\Sigma} = \frac{L}{L^2 \cdot \lambda_{эфф.ад.}} = \frac{1}{L \cdot \lambda_{эфф.ад.}}. \quad (3)$$

Приравнявая (2) обратное и (3), выведем окончательную формулу для вычисления эффективной теплопроводности при разбиении адиабатическими плоскостями:

$$R_6 = \frac{L_1}{((L - 2 \cdot \Delta)^2 + 4 \cdot L_1 \cdot \Delta) \cdot \lambda_2}.$$

Зная схему соединения тепловых сопротивлений:

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

$$\frac{1}{R_{34}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4},$$

$$\frac{1}{R_{56}} = \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6}.$$

Получим суммарное тепловое сопротивление при разбиении модели изотермическими плоскостями:

$$R_{\Sigma изот.} = 2 \cdot R_{12} + 2 \cdot R_{34} + R_{56} = \frac{1}{L \cdot \lambda_{эфф.изот.}}. \quad (5)$$

Из формулы (5) выражаем эффективную теплопроводность:

$$\lambda_{эфф.изот.} = \left[\frac{\delta}{(1-S^2) \cdot \lambda_1 + S^2 \cdot \lambda_2} + \frac{1-\delta-S}{(1-(1-\delta)^2) \cdot \lambda_1 + (1-\delta)^2 \cdot \lambda_2} + \frac{S}{(1-2 \cdot S \cdot \delta - (1-\delta)^2) \cdot \lambda_1 + ((1-\delta)^2 + 2 \cdot S \cdot \delta) \cdot \lambda_2} \right]^{-1}. \quad (6)$$

Известно [14-16] что разбиение модели адиабатическими плоскостями параллельными потоку тепла даёт несколько заниженное значение эффективной теплопроводности. Разбиение модели изотермическими плоскостями перпендикулярными потоку тепла даёт несколько завышенное значение эффективной теплопроводности. Поэтому в качестве лучшего приближения рекомендуется использовать их среднеарифметическое значение:

$$\lambda_{эфф} = \frac{\lambda_{эфф.ад.} + \lambda_{эфф.изот.}}{2}. \quad (7)$$

Оно будет отличаться от истинного не более половины их разности [16-18].

Результаты и обсуждение

Формула (7) проходит проверку на предельные переходы: при $\delta \rightarrow 0$ $\lambda_{эфф} = \lambda_2$. При $\delta = 1$ $\lambda_{эфф} = \lambda_1$.

Для прогнозных расчетов эффективной теплопроводности полых микросфер с перфорированными стенками в воздушной среде подобраны материалы микросфер с существенно различной теплопроводностью стенок от $\lambda_1 = 1,4$ до $\lambda_1 = 28$ Вт/(м·К). В полости микросфер и в порах перфорации стенок находится воздух.

Ниже представлены графики значений эффективной теплопроводности в зависимости от относительной толщины стенки микросферы и относительной площади перфорации стенок при фиксированном значении температуры.

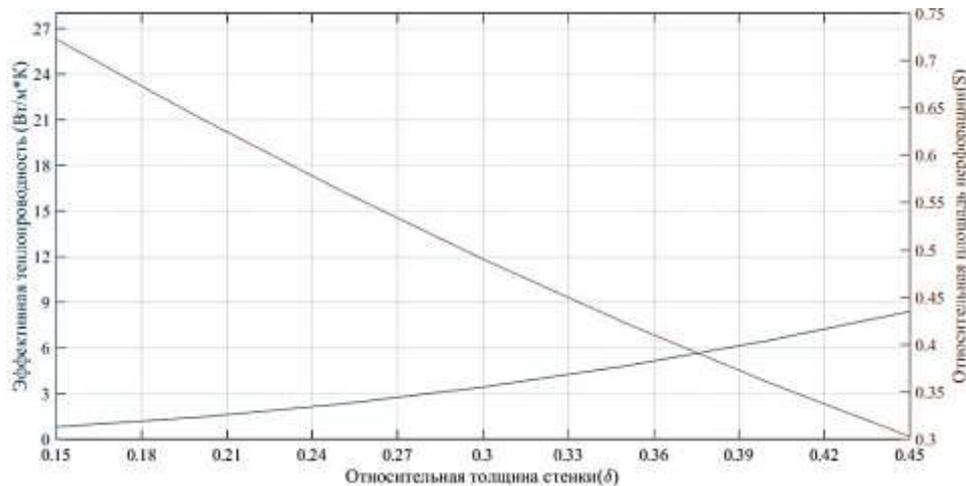


Рисунок 6 – Зависимость эффективной теплопроводности и относительной площади перфорации от относительной толщины стенки при $T = 400$ К и атмосферном давлении. Материал Al_2O_3 $\lambda_1 = 28$ Вт/(м·К), в порах воздух $\lambda_2 = 0,052$ Вт/(м·К)

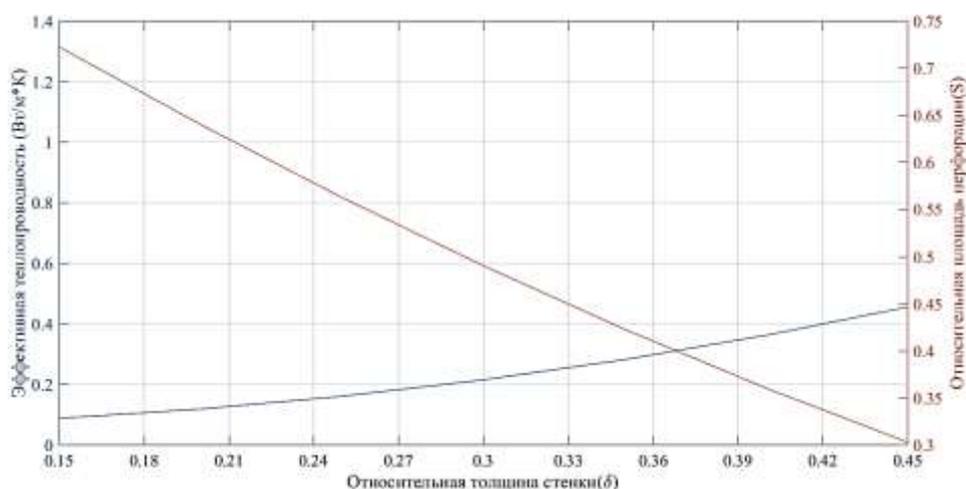


Рисунок 7 – Материал ZrO₂ λ₁=1,4 Вт/(м·К), в порах воздуха, при T = 400 К

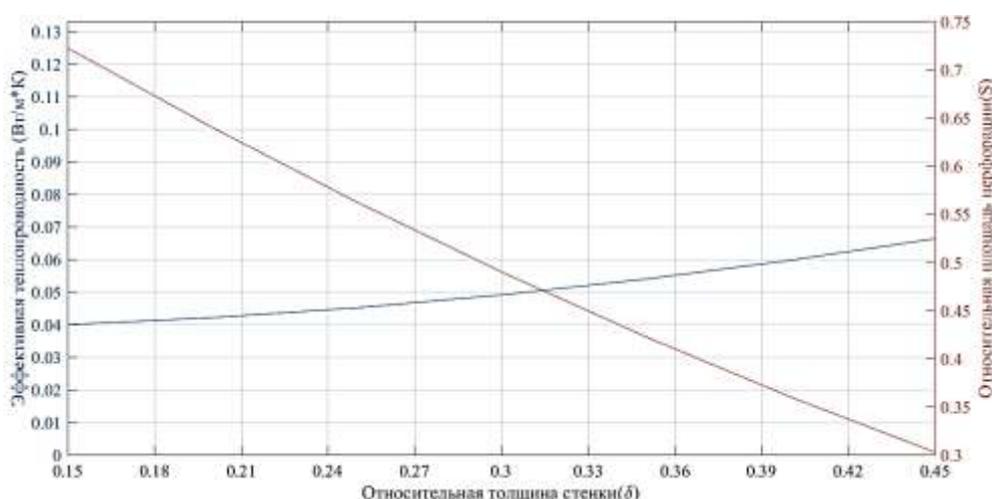


Рисунок 8 – Материал диэтилполисилоксан λ₁ = 0,13 Вт/(м·К), в порах воздуха при t = 20°C

Сравнение теоретических результатов, полученных по данной методике, с экспериментальными данными проводилось для, например, композиционных алюмо-стеклопластиков, и отклонение составило примерно 10% [19], что можно считать приемлемым результатом для прогнозных расчётов.

Заключение

В работе произведен сбор данных об области применения полых перфорированных микросферах, изучена их структура,

производство и дальнейшие перспективы их использования в качестве конструкционных или теплоизоляционных материалов. Методами теории обобщённой проводимости получены соотношения для аналитической оценки (расчёта/прогноза) эффективной теплопроводности полых микросфер с различным материалом стенок, вида газа в порах (воздуха или иных газов) и относительной площади перфорации стенок полых микросфер. Результаты работы могут быть использованы для прогнозирования свойств новых композиционных материалов в необходимом диапазоне температур.

Литература

- 1 Hossain K.M. Zakir, Patel Uresha, Kennedy Andrew, Macri Pellizzeri Laura, Sottile Virginie, M. Grant David, E. Scammell Brigitte, Ahmed Ifty. Porous calcium phosphate glass microspheres for orthobiologic application // Acta Biomaterialia. – 2018. – Vol.72. – P.396-406.
- 2 Pekarek K.J., Jacob J.S., Mathiowitz E. Double-walled polymer microspheres for controlled drug release // Nature. – 1994. – Vol.367 (6460). – P.258-260.

- 3 Labbaf S., Tsigkou O., Müller K.H., Stevens M.M., Porter A.E., Jones J.R. Spherical bioactive glass particles and their interaction with human mesenchymal stem cells in vitro // *Biomaterials*. – 2011. – Vol.32(4). – P.1010-1018.
- 4 Zhao X., Liu S., Yildirim L., Zhao H., Ding R., Wang H., Cui W., Weitz D. Injectable Stem Cell Laden Photocrosslinkable Microspheres Fabricated Using Microfluidics for Rapid Generation of Osteogenic Tissue Constructs // *Advanced Functional Materials*. – 2016. – Vol.26(17). – P.2809-2819.
- 5 Liu X., Jin X., Ma P.X. Nanofibrous hollow microspheres self-assembled from star-shaped polymers as injectable cell carriers for knee repair // *Nat Mater*. – 2011. – Vol.10(5). – P.398-406.
- 6 Li W., Walz J.Y. Porous Nanocomposites with Integrated Internal Domains: Application to Separation Membranes // *Sci. Rep.* – 2014. – Vol.4.
- 7 Yang Z.-C., Tang C.-H., Zhang Y., Gong H., Li X., Wang J. Cobalt monoxide-doped porous graphitic carbon microspheres for supercapacitor application // *Sci. Rep.* – 2013. – Vol.3. – Art.No 2925.
- 8 Ko Y.N., Park S.B., Choi S.H., Kang Y.C. One-pot synthesis of manganese oxide-carbon composite microspheres with three dimensional channels for Li-ion batteries // *Sci. Rep.* – 2014. – Vol.4. – Art.No 5751.
- 9 Demchenko V., Simyachko O., Svidersky V. Research of mineralogical composition, structure and properties of the surface of Ukrainian ash microspheres // *Technology audit and production reserves*. – 2017. – Vol.6. – P.28-34.
- 10 Peng C.Y., Zhao Q.H., Gao C.Y. Sustained delivery of doxorubicin by porous CaCO₃ and chitosan/alginate multilayers-coated CaCO₃ microparticles // *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp.* – 2010. – Vol.353 (2–3). – P.132–139.
- 11 Li Z.H., Jia Z., Luan Y.X., Mu T.C. Ionic liquids for synthesis of inorganic nanomaterials // *Curr Opin Solid State Mater Sci.* – 2008 – Vol.12 (1). – P.1–8.
- 12 Wu C., Wang Z., Zhi Z., Jiang T., Zhang J., Wang S. Development of biodegradable porous starch foam for improving oral delivery of poorly watersoluble drugs // *Int J Pharm.* – 2011. – Vol.403 (1–2). – P.162–169.
- 13 Гринчук П., Акулич А., Чернухо Е., Стетюкевич Н., Хилько М. Покрытия с добавлением полых стеклянных микросфер // *Наука и инновации*. – 2017. – №11(177). – С.16-20.
- 14 Li K., et al. Hermetically sealed porous-wall hollow microspheres enabled by monolithic glass coatings: Potential for thermal insulation applications // *Vacuum*. – 2022. – Vol.195. – Art.No 110667.
- 15 Логанина В.И., Фролов М.В., Рябов М.А. Теплоизоляционные известковые сухие строительные смеси для отделки стен из газобетона // *Вестник МГСУ*. – 2016. – №5. – С.82-92.
- 16 Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Справочная книга. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
- 17 Эдвабник В.Г. К теории обобщенной проводимости смесей // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 1(2). – 51 с.
- 18 Karol Pietrak, Tomasz S. Wiśniewski. A review of models for effective thermal conductivity of composite materials. // *J of Power Technologies*. – 2015. – Vol.95 (1). – P.14-24.
- 19 Алексеев Е.В. Структура и теплопроводность многослойных волоконно-армированных металлокомпозитов // *Альманах научных работ молодых учёных Университета ИТМО*. – 2022. – Т.1. – С.10-13.

References

- 1 Hossain K.M. Zakir, Patel Uresha, et al., *Acta Biomaterialia* 72, 396-406 (2018).
- 2 K.J. Pekarek, J.S. Jacob, E. Mathiowitz, *Nature* 367(6460), 258-260 (1994).
- 3 S. Labbaf, O. Tsigkou, et al., *Biomaterials* 32(4), 1010-1018 (2011).
- 4 X. Zhao, S. Liu, et al., *Advanced Functional Materials* 26(17), 2809-2819 (2016).
- 5 X. Liu, X. Jin, P.X. Ma, *Nat Mater* 10(5), 398-406 (2011).
- 6 W. Li, J.Y. Walz, *Sci. Rep.* 4 (2014).
- 7 Z.-C. Yang, C.-H. Tang, et al, *Sci. Rep.* 3, 2925 (2013).
- 8 Y.N. Ko, S.B. Park, S.H. Choi, Y.C. Kang, *Sci. Rep.* 4, 5751 (2014).
- 9 V. Demchenko, O. Simyachko, V. Svidersky, *Technology audit and production reserves*, 6 28-34 (2017).
- 10 C.Y. Peng, Q.H. Zhao, C.Y. Gao, *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp.* 353(2–3), 132–139 (2010).
- 11 Z.H. Li, Z. Jia, Y.X. Luan, T.C. Mu, *Curr Opin Solid State Mater Sci.* 12(1), 1-8 (2008).
- 12 C. Wu, Z. Wang, et al., *Int J Pharm.* 403(1–2) 162–169 (2011).
- 13 P. Grinchuk, A. Akulich, et al., *The Science and Innovations*, 11(177), 16-20 (2017). (in Russ.).
- 14 K. Li, et al. *Vacuum*, 195, 110667 (2022).
- 15 V. Loganina, M. Frolov, M. Ryabov, *Vestnik MGSU*, 5, 82-92 (2016). (in Russ.).
- 16 G. Dulnev, Yu.Zarichnyak, *Thermal conductivity of mixtures and composite materials. Reference book*, (Leningrad, Energy, 1974). (in Russ.).
- 17 V. Advabnik, *Modern problems of science and education*, 1-2, 51 (2015). (in Russ.).
- 18 Karol Pietrak, Tomasz S. Wiśniewski, *J. of Power Technologies*, 95 (1), 14-24 (2015).
- 19 E. Alekseev, *Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University*, 1, 10-13 (2022). (in Russ.).

История статьи:

Article history:

Поступила 01 сентября 2023 г.
Принята 28 февраля 2024 г.

Received 01 September 2023
Accepted 28 February 2024

Информация об авторах:

1. **Евгений Алексеев** (автор корреспондент) – PhD студент, Университет ИТМО (Российская Федерация, г.Санкт-Петербург), КазНУ им. аль-Фараби (Казахстан, г.Алматы, email: evgeniialekseev1996@mail.ru).

2. **Юрий Заричняк** – д.ф.-м.н., профессор Университет ИТМО (Российская Федерация, г.Санкт-Петербург), email: zarich4@gmail.com).

3. **Салтанат Болегенова** – д.ф.-м.н., профессор, КазНУ им. аль-Фараби (Казахстан, г.Алматы, email: Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz).

4. **Вячеслав Ходунков** – к.т.н., с.н.с. ВНИИМ им. Д.И.Менделеева (Российская Федерация, г.Санкт-Петербург), email: walkerearth@mail.ru)

Information about authors:

1. **E.V. Alekseev** (corresponding author) – PhD student, ITMO University (Russian Federation, Saint Petersburg), Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, email: evgeniialekseev1996@mail.ru).

2. **Yuriy Zarichnyak** – Dr. of Phys. and Math. Sc., Prof., ITMO University (Russian Federation, Saint Petersburg, email: zarich4@gmail.com).

3. **Saltanat Bolegenova** – Dr. of Phys. and Math. Sc., Prof., Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, email: Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz).

4. **Vyacheslav Khodunkov** – Cand. Of Tech.Sc., Researcher, D.I.Mendeleev VNIIM (Russian Federation, Saint Petersburg, email: walkerearth@mail.ru).