

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПОРИСТЫХ СРЕД, НАСЫЩЕННЫХ ФЛЮИДОМ

© 2009 Г.Г. Гусейнов^{1,2}

¹ Институт физики Дагестанского научного центра РАН

² Дагестанский государственный технический университет

Поступила в редакцию 27.11.2009

Впервые экспериментально исследована эффективная теплопроводность пористых стекол, насыщенного диоксидом углерода и н-гептаном в интервале температур 290-370 К и давлениях 1,333 Па-10 МПа. Выявлены механизмы передачи тепла, изучалось влияние температуры и давления, оценивалась роль молекул CO₂ и н-гептана, находящихся внутри пор, на поведение эффективной теплопроводности пористого стекла.

Ключевые слова: *теплопроводность, пористые стекла, диоксид углерода, н-гептан*

В настоящее время в различных отраслях науки и техники широкое применение находят пористые материалы, насыщенные жидкостью или газом. Одной из важных задач при их изучении является исследование их теплофизических свойств, в частности, коэффициента теплопроводности (λ). Пористые материалы, насыщенные жидкостью или газом, являются сложными объектами. Исследования λ в пористых материалах необходимы для моделирования и построения физической картины механизмов теплопередачи в неоднородных средах, и возможностей применения результатов исследований в народном хозяйстве. Пористые среды, насыщенные флюидами недостаточно экспериментально изучены в широкой области параметров состояния [1-4]. Хотя на сегодняшний день и имеется в литературе теоретические разработки и формулы, по которым можно рассчитать эффективную теплопроводность ($\lambda_{эфф}$) пористых сред, насыщенных жидкостью или газом, остается **актуальной задачей их экспериментального исследования**, т.к. они дают более конкретные и точные значения теплопроводности.

Работа была проведена с целью изучения поведения эффективной теплопроводности пористого стекла, насыщенного н-гептаном (C₇H₁₆) и диоксидом углерода (CO₂) в широкой области параметров состояния. Кроме того, ставилась задача определения влияния разнородных по массе и структуре молекул (C₇H₁₆) и (CO₂), находящихся внутри пор, на эффективную теплопроводность пористого стекла.

В качестве объектов исследования были выбраны пористые спеченные материалы из стекла, имеющие твердый каркас и взаимо-

проникающие поры, которые являются модельными объектами исследования – они однородны и могут быть использованы как модели различных гетерогенных сред. В работе использованы пористые стекла, изготовленные из: кварцевого стекла марки КВ, химически стойкого стекла ХСЗ, стекла АБ-1, которые имели среднюю пористость, соответственно 10%, 40%, 40%. Стекла имели средний размер пор, соответственно: $6 \cdot 10^{-5}$, $16 \cdot 10^{-6}$, $16 \cdot 10^{-6}$ м., диаметр $42 \cdot 10^{-3}$ м., толщину $3055 \cdot 10^{-6}$ м. Стекла КВ, ХСЗ и АБ-1 имели следующие составы: SiO₂ – 99,9%; SiO₂ – 71,5%, Na₂O – 14,5%, CaO – 6,5%, Al₂O₃ – 2,5% и SiO₂ – 75%, Na₂O – 13%, CaO – 4%, MgO – 5%, Al₂O₃ – 3%. Другими объектами исследования были выбраны чистые вещества: C₇H₁₆ и CO₂, у которых теплопроводность достаточно хорошо изучена в широкой области параметров состояния [5]. Эти вещества в исследованной области температур и давлений стабильны и не разлагаются.

Для получения достоверных экспериментальных данных измерения теплопроводности проведены абсолютным стационарным методом плоского горизонтального слоя. Разработанные нами и многократно проверенные высокоточные устройства [6, 7] позволяют получать данные с погрешностью, не превышающей 1,2%. Измерение теплопроводности проводили по изобарам при фиксированной температуре, с изменением давления. На рис.1. приведены результаты экспериментального исследования $\lambda_{эфф}$ пористых стекол, изготовленные из: кварцевого стекла марки КВ, химически стойкого стекла ХСЗ, стекла АБ-1, насыщенные CO₂ в интервале температур 290-370 К при различных давлениях.

Гусейнов Гасан Гусейнович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. E-mail: guseinovgg@mail.ru

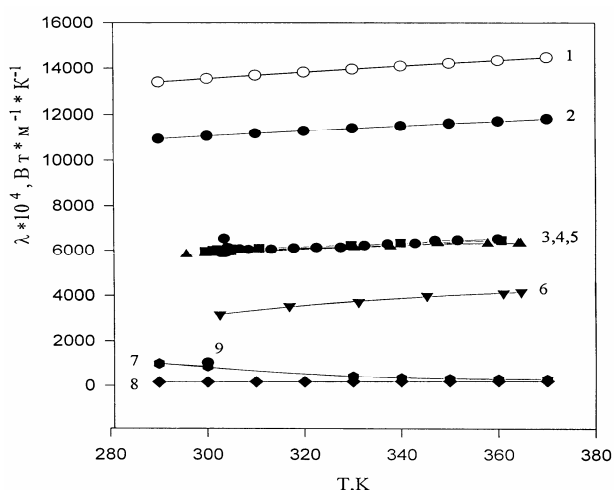


Рис. 1. Зависимости теплопроводности веществ от температуры:

1 – кварц плавный марки КВ [8]; 2 – пористое кварцевое стекло, насыщенное CO_2 при давлении 18,7 МПа; 3 – пористое стекло АБ-1 (Пор16), насыщенное CO_2 при давлении 10 МПа; 4, 5 – пористое стекло ХС3 (Пор16), насыщенное CO_2 при давлениях, соответственно 10 МПа, 3,432 МПа; 6 – пористое вакуумированное стекло ХС3 (Пор16) при давлении 1,333 Па; 7, 8 – CO_2 при давлениях 10 МПа и 0,1 МПа [5]; 9 – CO_2 внутри пор стекла (расчет)

На рис. 1 для большей наглядности показана иерархия теплопроводности веществ, исследованных автором, а также приведены значения теплопроводности материалов, имеющиеся в литературе. Из рис.1 видно, что с увеличением температуры $\lambda_{\text{эфф}}$ пористых стекол, насыщенных CO_2 , растет во всем исследованном интервале температур. Самую большую теплопроводность имеет плавное кварцевое стекло марки КВ. Также видно, что $\lambda_{\text{эфф}}$ пористого кварцевого стекла, насыщенного CO_2 на 65-75 и 70-80%, больше, чем у пористого стекла АБ-1 и ХС3, насыщенного CO_2 при давлении 10 МПа. По-видимому, это связано с тем, что кварцевое стекло более однородно, чем стекла АБ-1 и ХС3, причем $\lambda_{\text{эфф}}$ в насыщенных образцах гораздо больше, чем в вакуумированном пористом стекле ХС3 (см. рис.1). Рост теплопроводности по изобарам в интервале температур 290-370 К для пористого кварцевого стекла (18,7МПа), стекла АБ-1 (10МПа) и ХС3 (10МПа), насыщенного CO_2 , соответственно составляют 21%, 16% и 10,08%.

Приводятся результаты и экспериментального исследования $\lambda_{\text{эфф}}$ пористого стекла, насыщенного C_7H_{16} и CO_2 , в интервале температур 290-370 К и давлениях 0,1-10 МПа (рис. 2). Из графика видно, что с увеличением температуры $\lambda_{\text{эфф}}$ пористого стекла, насыщенного C_7H_{16} и CO_2 , растет. Кроме того, она растет и с увеличением давления от 0,1 МПа до 10 МПа.

Рост $\lambda_{\text{эфф}}$ в зависимости от температуры для пористого стекла, насыщенного C_7H_{16} и CO_2 , соответственно: 11,03% и 10,08%. Кроме того, в одном и том же образце, и при одних и тех же параметрах, $\lambda_{\text{эфф}}$ в насыщенных C_7H_{16} образцах больше, чем в образцах с CO_2 (см. рис. 2). В интервале температур 290-370 К оно достигает 15,27%, в то время, как разница между теплопроводностью C_7H_{16} и CO_2 в свободном состоянии при тех же параметрах составляет 46-244%.

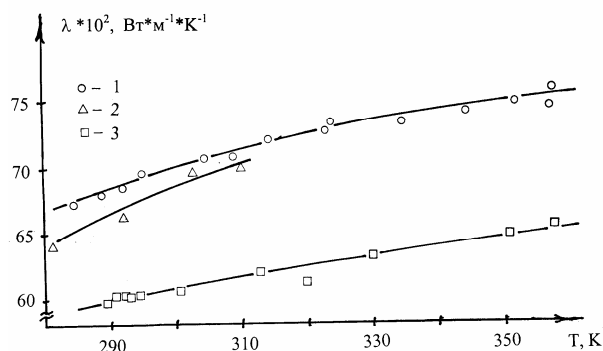


Рис. 2. Зависимость эффективной теплопроводности пористого стекла от температуры: 1, 2, 3 соответственно: $\lambda_{\text{эфф}}$ пористого стекла, насыщенного C_7H_{16} при давлении 10 МПа, 0,1 МПа, и CO_2 при давлении 10 МПа

Из рис.1. видно, что рост $\lambda_{\text{эфф}}$ происходит почти по линейному закону. Это соответствует утверждению Киттеля [9] о том, что в аморфных материалах при комнатных и более высоких температурах теплопроводность определяется соотношением:

$$\lambda = \text{const } T; \tag{1}$$

Пористые стекла, насыщенные флюидом представляют систему, состоящую из многих фаз – твердое тело, жидкость и газ [10]. В пористом стекле, насыщенном диоксидом углерода, тепло передается через скелет каркас (зерно), контактные пятна, молекулами газа или жидкостью, и излучением:

$$Q = Q_{\text{кондук}} + Q_{\text{конвек}} + Q_{\text{рад}}; \tag{2}$$

где $Q_{\text{конд.}}$, $Q_{\text{конв.}}$, $Q_{\text{рад.}}$ соответственно кондуктивная, конвективная и радиационная составляющие передачи тепла. Радиационная составляющая теплопроводности оценена по формуле [11]:

$$\lambda = 2 \varepsilon^2 \sigma T^3 h; \tag{3}$$

Она мала – 3 $10^{-5}\%$ от $\lambda_{\text{эфф}}$ для пористого стекла, и $\approx 7 \cdot 10^{-6}\%$ от величины теплопроводности кварцевого стекла, и ею можно пренебречь.

Передачу тепла конвекцией не учитывали из-за ограниченного размера пор и микрозазоров на стыке частиц, что препятствует возникновению конвекции.

Передача тепла в пористом стекле, насыщенном C_7H_{16} и CO_2 , в основном осуществляется теплопроводностью основы-скелета пористого материала (аморфное вещество), где имеет место фононный механизм передачи тепла. Факт того, что $\lambda_{эфф}$ пористого кварцевого стекла, насыщенного CO_2 , меньше λ стекла матрицы, можно объяснить возникновением теплового сопротивления, искривлением линий теплового потока и их стягиванием к микропятнам касания зерен – механизм рассеяния фононов на неоднородностях.

Результаты исследований также показывают, что $\lambda_{эфф}$ пористого кварцевого стекла, насыщенного CO_2 , больше, чем у стекол марки ХСЗ и АБ-1, насыщенного CO_2 . Причина такого поведения, по-видимому, связана с тем, что структура кварцевого стекла более однородна, что приводит к меньшему рассеянию фононов на неоднородностях в стекле. Полученные экспериментальные результаты по теплопроводности пористых стекол могут внести определенный вклад в деле более точного выявления механизмов передачи тепла теплопроводностью в стеклах в исследованном интервале температур.

Результаты экспериментального исследования $\lambda_{эфф}$ пористого стекла, насыщенного диоксидом углерода, мы решили сравнить с вычисленными значениями $\lambda_{эфф}$ пористого стекла, насыщенного CO_2 , полученным по известным из литературы уравнениям. Для расчета теплопроводности стекла (зерна) воспользовавшись формулой Миснар А. [4], зная доли компонентов пористого стекла:

$$\lambda = 9,3 \cdot 10^{-2} \cdot n \cdot M^{5/6} \cdot (T_{пл} \cdot \rho)^{1/2} \quad (4)$$

Для использованного в нашей работе пористого стекла ХСЗ доли компонентов таковы: $P_{SiO_2}=0,715$; $P_{Na_2O}=0,145$; $P_{CaO}=0,065$; $P_{Al_2O_3}=0,025$; $P_{Al_2O_3^1}=0,025$. Тогда $\lambda_{эфф}$ (ст. матрицы) = $1,1066 (Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1})$. Для вычисления $\lambda_{эфф}$ пористых стекол, насыщенных флюидом, мы выбрали формулу Литовского Е.Я. [12]:

$$\lambda_{эфф} / \lambda_{ТВ} = (1-P) (1-P)^{1/2} + P^{1/4} \gamma; \quad (5)$$

где соответственно: $\lambda_{эфф}$, $\lambda_{ТВ}$, $\lambda_{пор}$ – теплопроводность пористого материала, материала матрицы и вещества внутри пор; $\gamma = \lambda_{пор} / \lambda_{ТВ}$; P – пористость. Рассчитаем эффективную теплопроводность пористого стекла, насыщенного диоксидом углерода при $T=300K$ по фор-

муле (5). Тогда, учитывая, что: $\lambda_{ТВ}=1,1066 (Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1})$, $P=0,4$; $\lambda_{CO_2} (T=300 K, P=10 MPa)=0,0874 (Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1})$, получим: $\lambda_{эфф} = \lambda_{ТВ} (1-P) \cdot (1-P)^{1/2} + P^{1/4} \lambda_{CO_2}$. Откуда для пористого стекла, насыщенного CO_2 – $\lambda_{эфф}=0,591223 (Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1})$. Для пористого же стекла, насыщенного CO_2 при температуре 300 К и при давлении 10 МПа экспериментальное значение $\lambda_{эфф}=0,5961 (Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1})$. Расхождение составляет (- 0,818151%).

Выводы: проведенные исследования показывают, что передача тепла в пористых – гетерогенных материалах в основном осуществляется по скелету–матрице, и только его часть передается по флюиду, находящемуся в межпоровом пространстве. Полученные результаты также могут быть использованы для решения прикладных задач – изучению структуры теплового поля земной коры и процессов, связанных с поисками, разведкой, разработкой нефтяных и газовых месторождений, способствуют расширению задач термокаротажа скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Чудновский, А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.: ГИФМЛ, 1962. – 456 с.
2. Морохов, И.Д. Физические явления в ультрадисперсных средах / И.Д. Морохов, Л.И. Лаповок. – М.: Энероатомиздат, 1984. – 224 с.
3. Дульнев, Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
4. Миснар, А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. – М.: Мир, 1968. – 464 с.
5. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
6. Патент Российской Федерации № 2096773 кл. 6 G 01 N25/20. Гусейнов Г.Г. Устройство для измерения теплопроводности. – Бюл. Изобретения. ВНИИПИ. – М. 1997, № 32, ч.2, С.345.
7. Патент Российской Федерации № 2124717 кл. 6 G 01 N25/18. Гусейнов Г.Г. Устройство для измерения теплопроводности. – Бюл. Изобретения. ВНИИПИ. – М. 1999, № 1, С.414.
8. ГСССД 660-84. Кварц плавный марки КВ. Коэффициент теплопроводности в диапазоне температур 80-500 К. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 16 с.
9. Kittel, C. Interpretation of thermal conductivity of glasses // Phys. Rev. – 1949. – V. 75. - N 6. - P. 972-985.

10. Хейфец, Л.И. Многофазные процессы в пористых средах / Л.И. Хейфец, А.В. Неймарк. – М.: Химия, 1982. – 319 с.
11. Мень, А.А. Степень черноты кварцевого стекла / А.А. Мень, З.С. Сеттарова // Теплофизика высоких температур . – 1972. – Т. 10, №2. – С. 279-284.
12. Литовский, Е.Я. Интерполяционная формула для выражения зависимости теплопроводности от пористости твердых материалов // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1980. - № 16. – С. 559-569.

THERMAL CONDUCTIVITY OF POROUS MEDIUM, SATURATED BY THE FLUID

© 2009 G.G. Guseynov ^{1,2}

¹ Institute of Physics Dagestan Scientific Centre RAS

² Dagestan State Technical University

For the first time effective thermal conductivity of the porous glasses, saturated by carbon dioxide and n-heptane in the interval temperatures of 290-370 K and pressures 1,333 Па-10 МПа is experimentally researched. Mechanisms of a heat transport are revealed, effect of temperature and pressure was studied, the role of molecules CO₂ and n-heptane, being inside of pores, on behaviour of effective thermal conductivity of porous glass was sized up.

Key words: *thermal conductivity, porous glasses, carbon dioxide, n-heptane*