

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НАНОПОРОШКОВ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Нанопорошки широко применяются в производстве резины, загустителей смазочных материалов, клеев, красок, адсорбентов в хроматографии. В связи с этим важно определение теплопроводности различных нанопорошков.

Известно [1], что нанопорошки имеют низкую теплопроводность и могут быть использованы в качестве теплоизоляторов (в том числе в теплоизолирующих панелях домов).

В статье проводится сравнение коэффициентов теплопроводности широко применяемого за рубежом нанопорошка диоксида кремния Аэросил (фирма Degussa, Германия) [2,3] и нанопорошка диоксида кремния Таркосил [4,5], производимого в ИТПМ СО РАН и ИЯФ СО РАН.

Методика получения нанопорошка Таркосил основана на испарении исходного вещества (дешевого кварцевого песка) под воздействием созданного при помощи ускорителя электронного пучка. Схема установки представлена на рис.1. Таркосил производится на открытом воздухе без использования специальной атмосферы. После испарения газ движется по трубопроводу, где охлаждается. Находящиеся в нем наночастицы образуют агломераты. Выгружается порошок из циклонов и из фильтра установки. Благодаря не слишком большой энергии пучка (1,4 МэВ) образование опасных радиоактивных изотопов невозможно, и получаемый порошок безвре-

ден. Способ позволяет получать также нанопорошки других веществ. Нанопорошок диоксида кремния Таркосил имеет средний размер частиц 23 нм [5].

Фирма Degussa использует для производства нанопорошка SiO₂ (Аэросил) химические методики синтеза. Получение нанопорошка основано на реакции горения. В продуктах реакции находится хлористый водород (HCl, при наличии конденсированной воды – соляная кислота), который затем в основном отделяется. Остаточное содержание HCl указывается на каждой партии порошка.

В обоих способах сначала образуется газообразная смесь, после чего молекулы вещества соединяются, образуя первичные частицы. Затем возникают агломераты.

Предмет исследования – нанопорошок диоксида кремния – рассматривается авторами как тяжелый газ. Ввиду того, что эксперимент по определению коэффициентов теплопроводности осуществлялся на воздухе, принимается, что измерения проводились для смеси газов: воздуха и газа, состоящего из тяжелых частиц твердого вещества. Это допущение позволило применить для расчетов обычную теорию для теплопроводности газов.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГАЗОВ

Общее уравнение теплопроводности, выражающее баланс теплоты в какой-то среде, имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{c_v \rho},$$

где $\chi = \lambda / c_v \rho$ – коэффициент температуропроводности среды, λ – коэффициент теплопроводности, q – внутренний источник теплоты.

Эксперименты проводились в сферическом сосуде без внутренних источников тепла с поддержанием постоянной внешней температуры. В этом случае уравнение теплопроводности в сферических координатах выглядит:

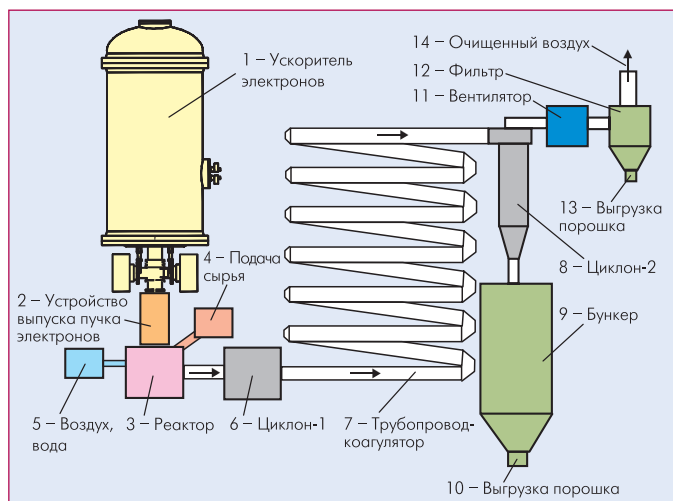


Рис.1 Схема опытно-промышленной установки по получению нанопорошка Таркосил

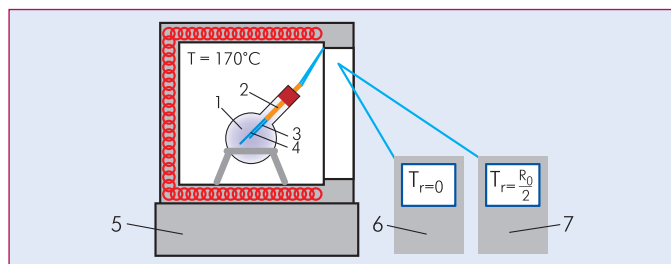


Рис.2 Схема экспериментальной установки

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right).$$

Решая уравнение относительно T и предполагая, что $T = X(r)Y(t) + T_0$, получаем:

$$T = T_0 \left(1 - \frac{\alpha}{r} \sin \left(\frac{r}{\alpha} \right) \exp \left\{ -\frac{\chi t}{\alpha^2} \right\} \right), \quad (1)$$

где α – неизвестная константа.

В результате получено уравнение с двумя неизвестными (α и χ), с помощью которого можно найти коэффициент теплопроводности. Для его экспериментального разрешения необходимо измерить температуру нанопорошка на различных расстояниях от центра, например, в точках $r = 0$ и $r = R_0/2$, где R_0 – радиус сосуда.

Схема экспериментальной установки представлена на рис.2. В эксперименте использовалась тонкостенная стеклянная колба радиуса $R_0 = 0,05$ м (1). Внутрь колбы, заполненной нанопорошком диоксида кремния, через медную трубку малого, по сравнению с размерами сосуда, диаметра (2) были введены термопары с заданным относительно центра ($r = 0$) (3) и $r = R_0/2$ (4) положением, показания которых снимались мультиметрами (6 и 7). Затем колба помещалась в печь (5), в которой поддерживалась постоянная температура 170°C. Значения комнатной температуры 23°C для экспериментов с Таркосилом и 27°C – с Аэросилом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Были построены графики зависимости температуры от времени для двух нанопорошков диоксида кремния – Таркосила и Аэросила (рис.3).

Температура внутри колбы, возможно, по экспоненте, стремится со временем к внешнему ее значению. Для проверки этого предположения на основе экспериментальных данных построены соответствующие экспоненциальные зависимости от времени

$$E = \exp \left\{ \frac{\chi t}{\alpha^2} \right\} = \frac{T_0}{T_0 - T(r,t)} \frac{r}{\alpha} \sin \left(\frac{r}{\alpha} \right)$$

на базе формулы (1) для $r = 0$ и $r = R_0/2$, где

$$\alpha^2 = \frac{R_0^2}{40(1 + \sqrt{1 - 1,2(1 - \gamma)})}, \quad \gamma = \frac{T_0 - T(R_0/2, t)}{T_0 - T(0, t)}.$$

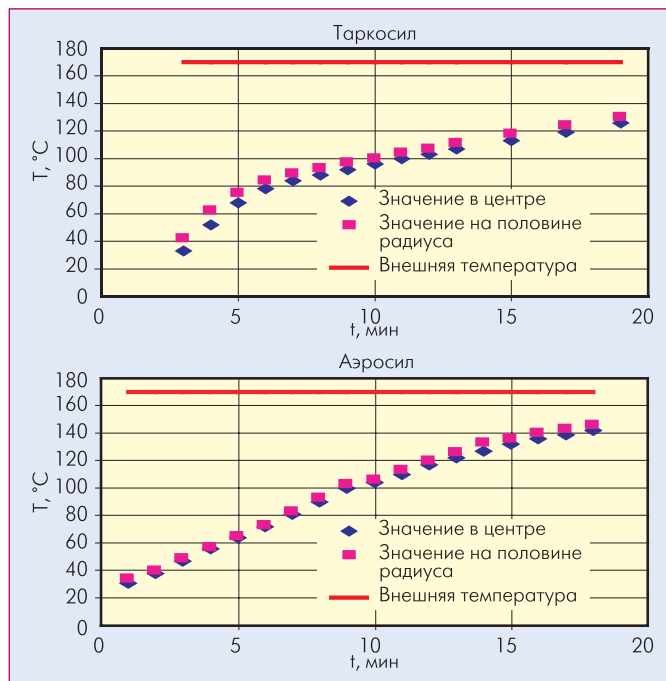


Рис.3 Зависимость температуры от времени на разных расстояниях от центра ($r = 0$ и $r = R_0/2$) колбы

Расчетные данные были сопоставлены с полученными отдельными экспериментальными точками (рис.4).

Экспонента достаточно хорошо аппроксимирует экспериментальные данные, это свидетельствует о допустимости предположения о том, что нанопорошок можно считать тяжелым газом.

Исходя из теоретических выкладок, рассчитывается значение коэффициента теплопроводности в каждый момент времени (рис.5). Из этих графиков следует, что коэффициент теплопроводности мало меняется во время эксперимента, и, следовательно, можно найти его среднее значение:

$$\begin{aligned} \text{для Таркосила} & - \lambda = (2,67 \pm 0,03) \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2\text{К}; \\ \text{для Аэросила} & - \lambda = (3,25 \pm 0,07) \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2\text{К}. \end{aligned}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Полученные значения коэффициентов теплопроводности нанопорошков диоксида кремния (Таркосила и Аэросила) малы по сравнению со стеклом ($630 \cdot 10^{-3}$ Вт/м²К) и воздухом ($24 \cdot 10^{-3}$ Вт/м²К), что делает их хорошим теплоизолятором.

2. Значения коэффициентов теплопроводности для Таркосила и Аэросила различаются. Возможно, это связано с тем, что Аэросил получается методом сжигания SiCl_4 в водороде и кислороде. В результате нанопорошок диоксида кремния содержит примесь хлора, имеющего меньшую теплоемкость и, следовательно, увеличивающего теплопроводность. В Таркосиле существуют другие примеси. Несмотря на то, что средний размер сравниваемых нанопорошков одного порядка, некоторое отличие в размерах частиц все же наблюдается, что, видимо, также отражается на коэффициентах теплопроводности.

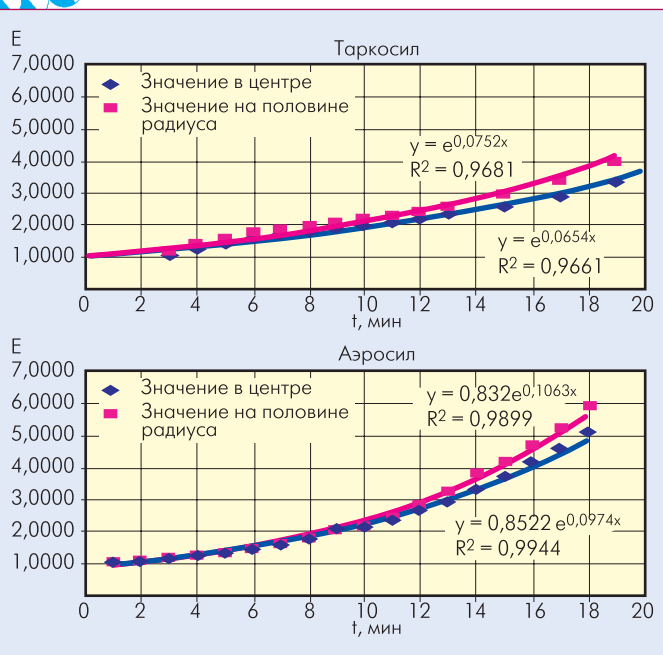


Рис.4 Сравнение экспериментальных точек с экспоненциальными зависимостями (на базе формулы (1), при расстояниях от центра $r = 0$ и $r = R_0/2$)

Таким образом, нанопорошок оксида кремния Таркосил не уступает по теплоизоляционным свойствам Аэросилу, и его использование в качестве теплоизолятора (в том числе в теплоизолирующих панелях домов) достаточно перспективно.

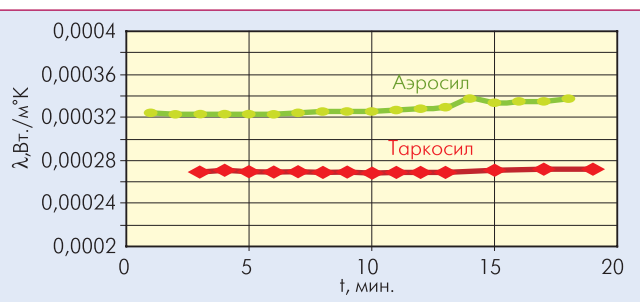


Рис.5 Зависимость коэффициентов теплопроводности от времени

ЛИТЕРАТУРА

1. Fricke J., Schwab H. Heat and Moisture Transfer in Vacuum Insulation Panels with Nanostructured Silica Kernels. – Topical Meeting of the European Ceramic Society "Nanoparticles, Nanostructures & Nanocomposites", July 5–7, 2004, Saint-Petersburg, Russia. Book of Abstracts, p.5.
2. Ferch H., Oelmuller R., Grinschgl B. Syntetic Silica as a Flow Aid and Carrier Substance. – Degussa Tech. Bull. 2004, №31.
3. Bode R., Ferch H., Fratzscher H. Basic characteristics of Aerosil. – Degussa Tech. Bull., 2006, №11.
4. Пат. 2067077 (РФ). Способ получения ультрадисперсной двуокиси кремния, устройство для его осуществления и ультрадисперсная двуокись кремния / Лукашов В.П., Бардаханов С.П., Салимов Р.А., Корчагин А.И., Фадеев С.Н., Лаврухин А.В. 1996.
5. Бардаханов С.П., Корчагин А.И., Куксанов Н.К., Лаврухин А.В., Салимов Р.А., Фадеев С.Н., Черепков В.В. – Доклады Академии наук, 2006, т. 409, №3, с. 320–323.