

Оптимизационно-аналитическое моделирование технологических режимов производства микрокремнезема для изоляционных панелей типа VIP

В.П.Селяев, МГУ им. Н.П. Огарёва

В.А.Неверов, МГУ им. Н.П. Огарёва

П.В.Селяев, МГУ им. Н.П. Огарёва

О.В.Ляскин, МГУ им. Н.П. Огарёва

Е.Л.Кечуткина, МГУ им. Н.П. Огарёва

Рассмотрены два способа синтеза мелкозернистого микрокремнезема из диатомитовых пород, пригодного для создания вакуумных теплоизоляционных панелей с теплопроводностью 0,002–0,02 Вт/м²к. Методом анализа детерминированных моделей переноса тепла в зернистых системах определены основные индикаторы, определяющие зависимость теплопроводности от физических и топологических свойств частиц диоксида кремния. Для оценки и регулирования теплопроводности зернистых систем, к основным индикаторам можно отнести: m_2 – пористость микроструктуры; ρ_k – плотность кластеров, формирующих микроструктуру; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – характеристику степени (диссипации энергии излучения) черноты частиц наполнителя; d_i – диаметр пор на i -ом масштабном уровне; λ_T , λ_G – теплопроводность твёрдой и газовой фазы системы; α – коэффициент аккомодации; N – координационное число; D – фрактальную размерность, характеризующую топологические особенности строения частиц, агрегатов, кластеров.

Проведён экспериментальный анализ свойств синтезированного микрокремнезема. В результате проведённых исследований установлено, что оптимальные свойства дисперсного микрокремнезема, синтезированного из опал-кристобалитовых биоморфных пород (диатомита Атемарского месторождения) путём осаждения оксида кремния из коллоидного раствора, получены при реализации второго способа производства. В процессе синтеза получен дисперсный микрокремнезём, представленный минералом опал, построенным из полимеризованных нитей аморфного кремнезема, которые свёрнуты в глобулы, шаровые кластеры диаметром в диапазоне 2–40 нм. Топология поверхности глобул характеризуется фрактальной размерностью $D = 2,32; 2,64$, что обеспечивает снижение значений коэффициента аккомодации и соответственно теплопроводности. Ассоциации шаровидных кластеров из частиц наноразмерного уровня формируют масштабно-инвариантную поровую структуру, обеспечивающую низкую теплопроводность¹.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ N 18-48-130001/18 «Оптимизационное моделирование свойств теплоизоляционных функционально-градиентных изделий на основе минеральных порошков оксида кремния, синтезированного из природного диатомита».

Ключевые слова: оксид кремния, диатомит, микрокремнезём, теплопроводность, модель, порог перколяции, пористость, плотность, координационное число, оптимизация.

Optimization and Analytical Modeling of Technological Modes of Production of Microsilica for Insulation Panels Type VIP

V.P.Selyaev, Ogarev Mordovia State University

V.A.Neverov, Ogarev Mordovia State University

P.V.Selyaev, Ogarev Mordovia State University

O.V.Lyaskin, Ogarev Mordovia State University

E.L.Kechytkina, Ogarev Mordovia State University

Two methods of synthesis of fine-grained microsilica from diatomite rocks suitable for creation of vacuum heat-insulating panels with thermal conductivity of 0,002–0,02 Wt/m²k are considered. The main indicators determining the dependence of thermal conductivity on the physical and topological properties of silicon dioxide particles are determined by the method of analysis of deterministic models of heat transfer in granular systems. To assess and regulate the thermal conductivity of granular systems, to the main indicators we can include: m_2 – porosity of the microstructure; ρ_k – density of clusters forming the microstructure; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – characteristic of the degree (dissipation of radiation energy) of the blackness of the filler particles; d_i – pore diameter at the i -th scale level; λ_T , λ_G – thermal conductivity of the solid and gas phase of the system; α – accommodation coefficient; N – coordination number; D – fractal dimension characterizing the topological features of the structure of particles, aggregates, clusters.

The experimental analysis of the properties of synthesized silica fume was carried out. As a result of the research, it was found that the optimal properties of dispersed silica, synthesized from opal-cristobalite biomorphic rocks (diatomite of the Atemar Deposit) by deposition of silicon oxide from colloidal solution, obtained in the implementation of the second method of production. In the process of synthesis, dispersed silica fume is obtained, represented by the mineral opal, constructed from polymerized strands of amorphous silica, which are folded into globules, ball clusters with a diameter in the range of 2–40 nm. The topology of the surface of globules is characterized by fractal dimension $D = 2,32; 2,64$, which reduces the values of the accommodation coefficient and, accordingly,

thermal conductivity. Association of the globular clusters of the particles of a nanoscale level to form scale invariant pore structure provides low thermal conductivity.

Keywords: silicon oxide, diatomite, microsilica, thermal conductivity, model, percolation threshold, porosity, density, coordination number, optimization.

Актуальность проблемы

Основной тренд в развитии цивилизации на современном этапе – борьба за энергоресурсы. Во многих странах Европы, в США и в России приняты программы, законы об энергосбережении и повышении энергетической эффективности: РФ – № 261-ФЗ от 23.11.2009 «Об энергосбережении и повышении эффективности»; Шведские строительные нормы – SBN-80 (1980); ФРГ – постановление по тепловой защите WSchVO. Установлено, что около 30% добываемых и создаваемых энергоресурсов расходуется на обогрев зданий и сооружений, при эксплуатации которых основные потери тепла происходят из-за низкой энергетической эффективности ограждающих конструкций. Согласно маркетинговым исследованиям DISCOVERY Research Group общая потребность рынка теплоизоляционных материалов в России составляет около 20–25 млн куб. м, и она в основном закрывается теплоизоляционными материалами на основе минеральной ваты, стекловолоконных изделий, пенополистирола. Однако, по мнению специалистов, эти материалы не отвечают требованиям экологии, пожарной безопасности, долговечности и надёжности [1–3]. В то же время перед строителями России поставлены задачи увеличения объёмов жилищного строительства в два раза и снижения удельного энергопотребления системой теплоснабжения до 35–40 Вт·ч/м²·°C·сут. (в будущем до 12 Вт·ч/м²·°C·сут.)

Для повышения энергоэффективности и разработки конструкций, отвечающих современным требованиям эксплуатации, предлагаются и разрабатываются теплоизоляционные изделия типа VIP (вакуумные теплоизоляционные панели) на основе тонкодисперсного наноструктурированного порошка микрокремнезёма. Микрокремнезём в виде порошка, содержащего более 90% диоксида кремния по массе, с крупностью частиц до 100 нм получают следующими методами: осаждения; пиролизом; щелочного гидролиза; автоклавирования и т.д. [5; 6]. Но эти методы либо энергозатратны, либо основаны на применении дефицитного сырья. В НИ МГУ им. Н.П. Огарёва на кафедре строительных конструкций разработан и предложен метод синтеза микрокремнезёма из опал-кristобалитовых горных пород, которые во многих регионах России представлены диатомитами. Биогенное происхождение диатомита, его аморфная структура позволяют снизить температуру плавления с 1720 °C до 1500 °C; повысить растворимость в щелочах при температуре 40–90 °C; получать частицы наноразмерного уровня в заданном диапазоне путём регулирования pH среды. Дисперсный микрокремнезём –

продукт широкого применения в строительстве, медицине, резинотехническом производстве, агрономии и птицеводстве [7–9]. Требования к дисперсному микрокремнезёму, пригодному для изготовления теплоизоляционных панелей, формируются из анализа молекулярной и газокинетической модели переноса тепла в зернистых системах.

Цель работы и задачи исследования

Оптимизировать технологические параметры синтеза оксида кремния из опал-кristобалитовых биоморфных пород с целью получения тонкодисперсных порошков микрокремнезёма, пригодных для создания вакуумных теплоизоляционных панелей с коэффициентом теплопроводности 0,002–0,02 Вт/м²·K.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- методом анализа феноменологических, газокинетических, перколяционных, топологических моделей переноса тепла в зернистых системах определить основные индикаторы, контроль которых позволит оценить и регулировать теплопроводность изделий;

- экспериментально изучить особенности формирования масштабно-инвариантной, иерархически организованной поровой структуры в зернистых системах на основе микрокремнезёма;

- оптимизировать технологические параметры синтеза диоксида кремния из диатомита с целью получения тонкодисперсных порошков, отвечающих функциональным, противопожарным, экологическим, технологическим требованиям, выполнение которых гарантирует создание вакуумных теплоизоляционных панелей с теплопроводностью в диапазоне 0,002–0,02 Вт/м²·K.

Анализ моделей переноса тепла в зернистых системах

Известно несколько основных методов моделирования процессов переноса тепла в зернистых, высокопористых структурах: феноменологический, газокинетический, перколяционно-топологический [10–12].

В феноменологической модели рассматриваются три механизма переноса тепла: кондуктивный, конвективный и лучистый (радиационный). Модель теплопроводности представляется аддитивным уравнением вида:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3, \quad (1)$$

где λ , λ_1 , λ_2 , λ_3 – коэффициенты, которые оценивают соответственно общую теплопроводность зернистой системы и вклад каждого механизма переноса тепла в общую λ .

Значения λ_1 , λ_2 , λ_3 предлагается определять по формулам вида:

$$\lambda_1 = a C_{vi} \rho; \quad \lambda_2 = \varepsilon \eta C_{v2}; \quad \lambda_3 = 4 \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_{\text{с.б}} T^3 d, \quad (2)$$

где a , C_{vi} , ρ – соответствующие характеристики твёрдого тела: температуропроводность, теплоёмкость, плотность; ε , η , C_{v2} – характеристики газовой фазы в порах, соответственно: $\varepsilon = (g C_p / C_{v2}) \times 0,25 - 1,25$; динамическая вязкость газа (η);

теплоёмкость изобарная (C_p) и изохронная (C_{v2}); ε_{np} , $\sigma_{с.б.}$, T , d – характеристики степени черноты (диссипации энергии) ограничивающих поверхностей; постоянная Стефана Больцмана ($\sigma_{с.б.}$), температура (T), диаметр пор (d).

Значение составляющей λ_2 зависит от давления газа P в порах. При низких давлениях газа конвективный механизм переноса тепла нарушается, столкновение молекул газа становится событием маловероятным, и реализуется механизм передачи энергии от молекул газа молекулам твёрдого тела, ограничивающего пространство поры.

Поэтому теплопроводность λ_2 можно оценивать таким способом в том случае, если соблюдается условие $K_n \ll 1$, где K_n – коэффициент подобия Кнудсена, равный отношению $K_n = \bar{l}/d$, где \bar{l} – средняя длина свободного пробега газа; d – диаметр поры; если $K_n \gg 1$, то предлагается λ_2 определять с учётом поправки равной $1/[1 + B/(pd)]$,

$$\lambda_2 = \frac{\varepsilon \eta C_{v2}}{1 + B/(P \cdot d)}, \quad (3)$$

где $B = f(a)$ – функция, зависящая от коэффициента аккомодации (a); P – давление; d – диаметр пор.

Газокинетическая модель основана на анализе двух механизмов передачи тепла – фононного и фотонного, которые реализуются в материалах, содержащих две фазы – твёрдую и газообразную. В работах С.О. Гладкова [12] модель переноса тепла в пористом теле представлена уравнением вида:

$$\lambda = \frac{1}{3} \left(1 - \frac{m_2}{m_n}\right)^3 \cdot \frac{m_2}{m_n} \cdot \rho_k \cdot f_m + \frac{1}{3} \left(\frac{m_2}{m_n}\right)^2 \cdot d \cdot f_r, \quad (4)$$

где m_2 – пористость структуры; m_n – порог перколяции, который для модели из шариков, заполняющих матрицу, равен $\pi/6$; ρ_k – плотность материала шариков; f_m, f_r – физические константы материала матрицы шариков в порах при заданных значениях T .

Из анализа уравнений (1), (2), (3), (4), литературных данных [1; 10; 12; 13] следует, что к основным индикаторам, пригодным для оценки и регулирования теплопроводности зернистых систем, можно отнести: m_2 – пористость микро-структуры; ρ_k – плотность кластеров, формирующих микро-структуру; ε_{np} – характеристику степени (диссипации энергии излучения) черноты частиц наполнителя; d_i – диаметр пор на i -ом масштабном уровне; λ_t, λ_r – теплопроводность твёрдой и газовой фазы системы; a – коэффициент аккомодации; N – координационное число; D – фрактальную размерность, характеризующую топологические особенности строения частиц, агрегатов, кластеров.

Два способа синтеза оксида кремния из опал-кристаллитового сырья и экспериментальный анализ свойств синтезированного микрокремнезёма

Экспериментальные исследования свойств микрокремнезёма, синтезированного двумя способами, проводились с целью оптимизации технологических режимов, обеспечивающих получение порошков с максимальной пористостью и содержанием оксидов кремния более 99% и частиц нано-

размерного уровня с топологией поверхности, необходимой для демпфирования и рассеивания молекул газа.

В первом случае диатомит измельчался до состояния пудры, смешивался с щелочными плавнями и затем путём выщелачивания сплава дистиллированной водой получали золь кремниевой кислоты. Осаждение кремниевой кислоты производили концентрированным раствором соляной кислоты и после выпаривания получали порошок с содержанием оксида кремния 95–97%, с невысокой дисперсностью (5–10 мкм) [5].

Во втором случае порошок диатомита выдерживали в 10–30-процентном водном растворе едкого натрия при температуре 50–120 °С и соотношении жидкой и твёрдой фазы 12:1. Получали золь кремниевой кислоты, который коагулировали и добавлением концентрированного раствора соляной кислоты осаждали диоксид кремния [6].

Оптимальные технологические режимы синтеза диоксида кремния определялись методами планирования экстремальных экспериментов [1; 15].

Установлено, что наиболее мелкодисперсный порошок микрокремнезёма с частицами размером 60–100 нм и содержанием диоксида кремния 99,97% синтезируется при соотношении жидкой и твёрдой фаз Ж:Т = 12:1, температуре и длительности термостатирования соответственно: 70–90 °С; 2–3 часа. Пористость зернистой системы превышает 90%, насыпная плотность около 200 кг/м³.

Зернистые системы в условиях свободной засыпки отличаются высокой пористостью $0,5 \leq m_2 \leq 0,98$. В то же время известно: порог перколяции m_n для систем, образованных шарами, равен $\pi/6$; при тетраэдрической упаковке $m_2 = 0,225$; октаэдрической – $m_2 = 0,414$; кубической – $m_2 = 0,47$. Очевидно, что при формировании макроструктуры в зернистой системе классические типы укладки частиц в виде шаров из плотных материалов обеспечивают пористость $m_2 < \pi/6$. Установлено, что при формировании поровой структуры зернистых систем реализуется принцип формирования «структура в структуре». Наиболее высокий уровень общей пористости достигается с уменьшением размеров частиц до нанометрового уровня. Так как в зернистых наполнителях VIP перенос тепла осуществляется по кондуктивному механизму, наиболее эффективной будет зернистая система с минимально низким координационным числом N_k . Если общую пористость обозначить через m , то, по предложению Г.Н. Дульнева, N_k определяется соотношением [10]:

$$N_k = \frac{m+3+\sqrt{m^2-10m+9}}{2 \cdot m}. \quad (5)$$

Принимаем $m = 0,95$, получаем $N = 2,3$, то есть имеем структуру близкую к цепочной, (фибриллярной), что маловероятно, так как в объёме из фибрилл формируются пачки (блоки), что приводит к повышению координационного числа.

Поэтому для обоснования и объяснения возможности получения из частиц диоксида кремния высокопористых структур, пригодных для создания панелей типа VIP, был произведён инструментальный анализ синтезированных кремнезёмов.

Гранулометрический состав порошков из синтезированного диоксида кремния изучался с применением оптического микроскопа OLYMPUS GX-71 и анализатора размеров частиц Shimadzu SALD 311, с использованием лазерного дифракционного анализа. Получали изображение агрегированных частиц (рис. 1) и гистограмму гранулометрического анализа дисперсного материала (рис. 2).

Из анализа экспериментальных данных следует, что в результате синтеза микрокремнезёма по второму способу создан порошок из агрегатов размером 60–100 нм. Размер частиц определяли с помощью оптического микроскопа Nikon LV-150. Отмечено, что при промывании порошка водой происходит агрегация более мелких образований (частиц, агрегатов), с увеличением линейных размеров до 10–15 мкм.

Рентгенофазовым анализом, произведённым с применением рентгеновских дифрактометров «Empyrean» с комплексом программ X'Pert Software и ДРОН-6, выявлено, что синтезированный микрокремнезём находится в аморфном состоянии.

Инфракрасной спектроскопией с применением инфракрасного фурье-спектрометра «Инфралюм» ФТ-02 определён элементный состав синтезированного порошка. Наибольшее количество диоксида кремния – 99,97% – содержится в микрокремнезёме, синтезированном из атемарского диатомита, экспонированного 60 минут при температуре 90 °С в 10-процентном растворе едкого натрия. Результаты термогравиметрического анализа (анализатор TGA/SDTA 851e), представленные в виде TGA-, DTG- и SDTA-кривых (рис. 3), свидетельствуют о том, что синтезированный диоксид кремния содержит значительное количество (до 21,5% по массе) адсорбированной «поровой воды», что характерно для минерала опал. Поэтому перед применением в качестве наполнителя VIP-панелей синтезированные порошки необходимо прогреть при температуре 460 °С.

Топография поверхности, морфология частиц, агрегатов микрокремнезёма изучалась с применением многофункционального растрового электронного микроскопа «Quanta» 200i 3D FEI с увеличением в диапазоне 3000x, 24000x. Анализ микрофотографий частиц, агрегатов подтверждает иерархичность строения структуры, наличие неровностей, пор, трещин на поверхности ассоциатов (рис. 4).

Структурные неоднородности на поверхности частиц, агрегатов исследованы методом малоуглового рентгеновского рассеяния с применением дифрактометра «Necus» S3-MICRO (Cu K_α – излучение с Ni-фильтром), который даёт возможность исследовать неоднородности с линейными размерами в пределах 2–60 нм. По кривым интенсивности рассеяния J_(θ) рентгеновских лучей (рис. 5) определена фрактальная размерность D = 2,32, которая соответствует системе достаточно компактных частиц с изрезанной (шероховатой поверхностью). Установлено, что рассеяние происходит на двух типах рассеивающих массовых фракталах и на трёхмерных неоднородностях с фрактальной размерностью D = 2,64.

Экспериментальные исследования малоуглового рентгенов-

ского рассеяния дают возможность рассчитать кривые распределения рассеивающих неоднородностей по размерам (рис. 6).

Данное распределение можно считать полимодальным. Первый пик соответствует радиусам частиц 2–4 нм, второй – 6–12 нм, третий – 12–20 нм. Следовательно, синтезированный

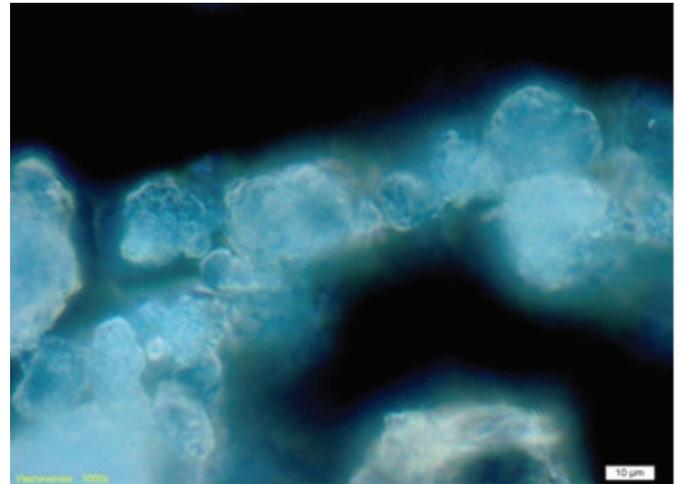


Рис. 1. Изображение агрегированных частиц

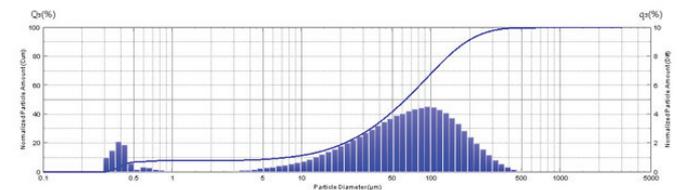


Рис. 2. Гистограмма гранулометрического анализа дисперсного микрокремнезёма

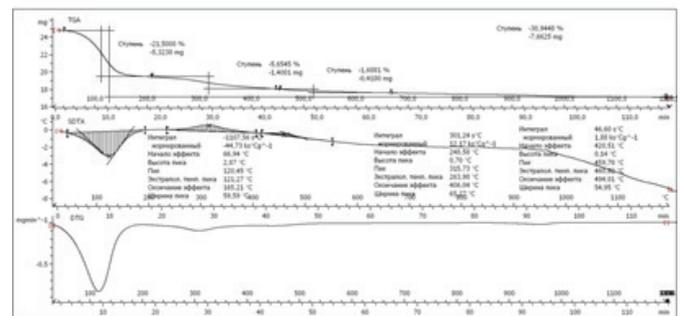


Рис. 3. Результаты термогравиметрического анализа

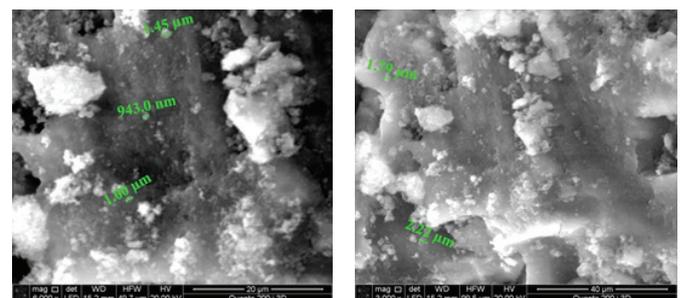


Рис. 4. Микрофотографии аморфного диоксида кремния при увеличениях: а) 3000x; б) 6000x

микрокремнезём представлен полидисперсной системой, рассеивающие частицы которой имеют линейные размеры (диаметры) в диапазоне 2–40 нм.

Коэффициент аккомодации a определяется по формуле Б. Бауле:

$$a = 1 - \left[\frac{M_1^2 + M_2^2}{(M_1 + M_2)^2} \right]^P, \quad (6)$$

где M_1, M_2 – массы молекул газа и материала стенки; P – число соударений молекулы и газа с твёрдой поверхностью. Так как $M_1 \ll M_2$, то a имеет значение близкое к нулю, тем более что фрактальная размерность 2,64 характеризует поверхность неоднородную и следовательно число $P \gg 1$.

Значение основных индикаторов качества синтезированного микрокремнезёма приведены в таблице 1.

Таблица 1. Индикаторы свойств синтезированного микрокремнезема

Способ	Индикатор							
	$S_iO_2, \%$	% выхода	$m_1, \%$	$d_1, \text{нм}$	N_k	D	α	$\lambda_1 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{М}^2\text{К}} \right]$
1	95–97	60	90	300–1000	2,6	2,32 2,64	<0,1	0,015
2	99,97	80	92-95	60–100	2,3	2,32 2,64	<0,1	0,005

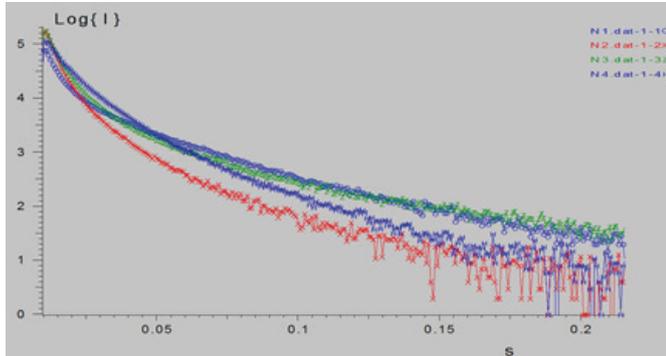


Рис. 5. Зависимость $I(s)$ малоуглового рентгеновского рассеяния дисперсных микрокремнезёмов от величины модуля вектора рассеяния S

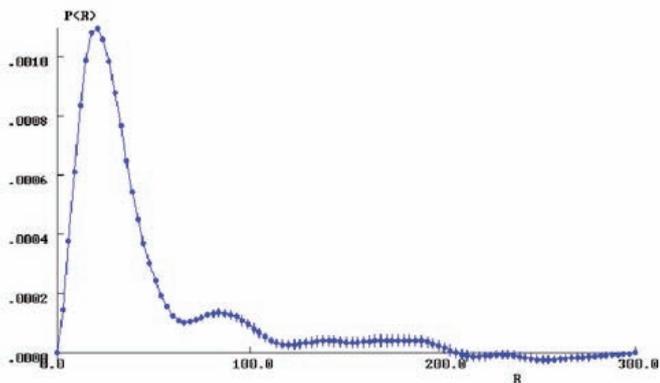


Рис. 6. Распределение по размерам частиц аморфного диоксида кремния (образец № 1)

В результате проведённых исследований установлено, что оптимальные свойства дисперсного микрокремнезёма, синтезированного из опал-кристобалитовых биоморфных пород (диатомита атемарского месторождения) путём осаждения оксида кремния из коллоидного раствора, получены при реализации второго способа производства. В процессе синтеза получен дисперсный микрокремнезём, представленный минералом опал, построенным из полимеризованных нитей аморфного кремнезёма, которые свёрнуты в глобулы, шаровые кластеры диаметром в диапазоне 2–40 нм. Топология поверхности глобул характеризуется фрактальной размерностью $D = 2,32; 2,64$, что обеспечивает снижение значений коэффициента аккомодации и соответственно теплопроводности. Ассоциации шаровидных кластеров из частиц наноразмерного уровня формируют масштабно-инвариантную поровую структуру, обеспечивающую низкую теплопроводность.

Литература

1. Теплоизоляционные материалы и изделия на основе вакуумированных дисперсных порошков микрокремнезема и диатомита : монография / В.П. Селяев, В.А. Неверов, А.К. Осипов [и др.]. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – 220 с.
2. Файств, В. Основные положения по проектированию пассивных домов. – М. : АСВ. – 144 с.
3. Строительный композит теплотехнического назначения на основе жидкого стекла и минеральных модификаторов : сб. статей / Ю.Г. Иващенко, И.Л. Павлова, А.В. Страхова, Н.А. Иващенко; Международный научно-практический симпозиум «Социально-экономические проблемы жилищного строительства и пути их решения в период выхода из кризиса». – Саратов : Изд-во СГТУ, 2010. – 41–44 с.
4. Савин, В.К. Строительная физика: энергоэкономика / В.К. Савин. – М. : Лазурь, 2011. – 418 с.
5. Способ получения тонкодисперсного аморфного микрокремнезема : патент 2526454 Рос. Федерация, МПК С 01 В 33/18. / В.П. Селяев, А.К. Осипов, А.А. Седова, Л.И. Куприяшкина; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева». – № 2013104054/05; заявл. 30.01.13; опубл. 20.08.14, Бюл. № 23. – 7 с.
6. Способ получения тонкодисперсного аморфного микрокремнезема золь-гель методом : патент N2625114 Рос. Федерация; патентообладатель ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева». – № 2016115956; опубл. 11.07.2017, Бюл. № 20. – 9с.
7. Неймарк, И.Е. Силикагель, его получение, свойства и применение / И.Е. Неймарк, Р.Ю. Шейфайн. – Киев : Наукова думка, 1973. – 202 с.
8. Медицинская химия и применение диоксида кремния / под. ред. А.А. Чуйко. – Киев : Наукова думка, 2003. – 415 с.
9. Tsai, W.T. Silica adsorbent prepared from spent diatomaceous earth and its application to removal of dye from

aqueous solution / . Silica adsorbent prepared from spent diatomaceous earth // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2004. – V. 275. – № 2. – P. 428–433.

10. Дульнев, Г.Н. Теплопроводность зернистых систем / Г.Н. Дульнев, З.В. Сигалова // *Инженерно-физический журнал*. – 1964. – Т. 7. – № 10. – С. 49–55.

11. Лыков, А.В. Теория теплопроводности. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.

12. Гладков, С.О. Газокинетическая модель теплопроводности гетерогенных веществ / С.О. Гладков // *Журнал технической физики*. – 2008. – Т. 78. – № 7. – С. 12–15.

13. Васильев, Л.Л. Теплофизические свойства пористых материалов / Л.Л. Васильев, С.А. Танаева. – Минск : Наука и техника, 1971. – 265 с.

14. Соломатов, В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, В.П. Селяев. Ташкент : ФАН, 1991. – 345 с.

15. Оптимизация технологических режимов получения золь-гель методом высокочастотного микрокремнезема с частицами наноразмерного уровня / В.П. Селяев, А.А. Седова, Л.И. Куприяшкина, А.К. Осипов // *Известия высших учебных заведений. Серия Строительство*. – 2018. – № 2 (710). – С. 5–13.

References

1. Selyaev V.P., Neverov V.A., Osipov A.K. [etal]. Teploizolyatsionnye materialy i izdeliya na osnove vakuumirovannykh dispersnykh poroshkov mikrokremlnezema i diatomite [Heat-insulating materials and products on the basis of vacuumed powders of microsilica and diatomite]: monografiya. Saransk, Publ. in Mordov. un-t, 2013, 220 p.

2. Fajstv V. Osnovnye polozheniya po proektirovaniyu passivnykh domov [Fist the framework for the design of passive houses]. Moscow, ASV. 144 p.

3. Ivashchenko G.YU., Pavlova L.I., Strakhov A.V., Ivashchenko N. Stroitel'nyy kompozit teplotekhnicheskogo naznacheniya na osnove zhidkogo stekla i mineral'nykh modifikatorov [Building composite heating purposes on the basis of liquid glass and mineral modifiers] : sb.statej. *Mezhdunarodnyj nauchno-prakticheskij simpozium «Sotsial'no-ekonomicheskie problemy zhilishhnogo stroitel'stva i puti ih resheniya v period vyhoda iz krizisa [Socio-economic problems of housing construction and ways to solve them in the period of recovery from the crisis]*. – Saratov, Publ. in SGTU, 2010, pp. 41–44.

4. Savin V.K. Stroitel'naya fizika: energoekonomika [Building physics: energyeconomy]. Moscow, Lazur', 2011, 418 p.

5. Sposob polucheniya tonkodispersnogo amorfnogo mikrokremlnezema [A method of producing finely dispersed

amorphous microsilica] : Pat.2526454 the Russian Federation, IPC C 01 b 33/18. V.P Selyaev, A.K. Osipov, A.A. Sedov, L.I. Kupryashkina; patentee: Federal state educational institution of higher professional education «Mordovian state University. N.P. Ogarev». No 2013104054/05; Appl. 30.01.13; publ. 20.08.14, bull., no. 23, 7 p.

6. Sposob polucheniya tonkodispersnogo amorfnogo mikrokremlnezema zol'-gel' metodom [A method of producing finely dispersed amorphous microsilica] : patent N2625114 Ros. Federatsiya ; patentoobladatel' FGBOU VPO «Mordovskij gosudarstvennyj universitet im. N.P. Ogareva». – № 2016115956; opubl. 11.07.2017, Byul. № 20. – 9s.

7. Nejmark I.E., SHEjfajn R.YU. Silikagel', ego poluchenie, svojstva i primeneniye [Silica gel, its preparation, properties and applications]. Kiev, Naukova dumka, 1973, 202 p.

8. Meditsinskaya himiya i primeneniye dioksida kremniya [Medical chemistry and application of silicon dioxide]. Chuiko A.A. (eds.). Kiev, Naukova dumka, 2003, 415 p.

9. Tsai W.T., Hsien K.J., Yang J.M Silica adsorbent prepared from spent diatomaceous earth and its application to removal of dye from aqueous solution. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, V. 275, no. 2, pp. 428–433.

10. Dul'nev G.N., Sigalova, Z.V. Teploprovodnost' zernistykh sistem [The Conductivity of granular systems by hfs]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal [Journal of Engineering Physics and Thermophysics]*, 1964, T. 7, no. 10, pp. 49–55.

11. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti [The Theory of thermal conductivity]. Moscow, Vysshaya shkola, 1967, 600 p.

12. Gladkov S.O. Gazokineticheskaya model' teploprovodnosti geterogennykh veshhestv [Gas-kinetic model of thermal conductivity of heterogeneous substances]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Technical Physics]*, 2008, T. 78, no. 7, pp. 12–15.

13. Vasil'ev L.L., Tanaeva S.A. Teplofizicheskie svojstva poristykh materialov [Thermal and Physical properties of porous materials. Minsk, Nauka i tehnika, 1971, 265 p.

14. Solomатов V.I., Vyrovoy V.N., Selyaev V.P. Polistrukturnaya teoriya kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov [Polystructural theory of composite construction- materials]. Tashkent, FAN, 1991, 345 p.

15. Selyaev V.P. Sedov A.A., Kupryashkina L.I., Osipov, A.K. Optimizatsiya tekhnologicheskikh rezhimov polucheniya zol'-gel' metodom vysokochastotnogo mikrokremlnezema s chastitsami nanorazmernogo urovnya [Optimization of technological modes of obtaining the Sol-gel method, high-frequency micro-silica with particles of nanoscale level. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Seriya Stroitel'stvo [News of higher educational institutions. Construction]*, 2018, no. 2 (710), pp. 5–13.

Селяев Владимир Павлович (Саранск). Доктор технических наук, профессор, академик РААСН. Заведующий кафедрой «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет» университета им. Н. П. Огарёва (430005, Саранск, ул. Большевикская, д. 68. МГУ им. Н.П. Огарёва). Эл.почта: ntorm80@mail.ru.

Неверов Вячеслав Александрович (Саранск). Кандидат физико-математических наук. Доцент кафедры физики твердого тела НИ Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва. Сфера научных интересов: Кристаллохимия координационных соединений переходных элементов; строение и свойства композиционных материалов. Автор около 45 публикаций. Тел: 8 (8342) 290541 E-mail: ua4uu@mail.ru

Селяев Павел Владимирович (Саранск). Кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет» университета им. Н. П. Огарёва (430005, Саранск, ул. Большевикская, д. 68. МГУ им. Н.П. Огарёва). Эл.почта: ntorm80@mail.ru.

Лияскин Олег Викторович (Саранск). Аспирант кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет» университета им. Н. П. Огарёва (430005, Саранск, ул. Большевикская, д. 68. МГУ им. Н.П. Огарёва). Эл.почта: oliyaskin@mail.ru.

Кечуткина Евгения Львовна (Саранск). Инженер кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет» университета им. Н. П. Огарева (430005, Саранск, ул. Большевикская, д. 68. МГУ им. Н.П. Огарёва). Эл.почта: ntorm80@mail.ru.

Selyaev Vladimir Pavlovich (Saransk). Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAACS. Head of the Department "Building constructions" of the National Research Ogarev Mordovia State University (68 Bolshevistskaya Str., Saransk, 430005. Ogarev Mordovia State University). E-mail: ntorm80@mail.ru.

Neverov Vyacheslav Aleksandrovich (Saransk). Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Associate Professor of the Department of Solid-State Physics at the National Research Ogarev Mordovia State University (68 Bolshevistskaya Str., Saransk, 430005. Ogarev Mordovia State University). Tel: 8 (8342) 290541. E-mail: ua4uu@mail.ru.

Selyaev Pavel Vladimirovich (Saransk). Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Building constructions" of the National Research Ogarev Mordovia State University (68 Bolshevistskaya Str., Saransk, 430005. Ogarev Mordovia State University). E-mail: ntorm80@mail.ru.

Liyaskin Oleg Viktorovich (Saransk). Post-graduate student of the Department "Building constructions" of the National Research Ogarev Mordovia State University (68 Bolshevistskaya Str., Saransk, 430005. Ogarev Mordovia State University). E-mail: oliyaskin@mail.ru.

Kechutkina Evgenia Lvovna (Saransk). Engineer of the Department "Building constructions" of the National Research Ogarev Mordovia State University (68 Bolshevistskaya Str., Saransk, 430005. Ogarev Mordovia State University). E-mail: ntorm80@mail.ru.