

УДК 538.9:621.002.3

**С. П. Бардаханов**<sup>1</sup>, **Л. С. Викулина**<sup>2</sup>, **В. И. Лысенко**<sup>1</sup>, **А. В. Номоев**<sup>2</sup>  
**С. А. Полуянов**<sup>3,4</sup>, **Ф. В. Тузиков**<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Институт теоретической и прикладной механики  
им. С. А. Христиановича СО РАН  
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Бурятский государственный университет  
ул. Смолина, 24а, Улан-Удэ, 670000, Россия

<sup>3</sup> Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, 5, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>4</sup> Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: bard@itam.nsc.ru

## **АНАЛИЗ НАНОПОРОШКОВ МЕТОДОМ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЙНИЯ \***

Исследована возможность применения метода малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) для качественного и количественного анализа нанопорошков. Исследования проведены на восьми порошках диоксида кремния (в том числе четырех, полученных авторами с помощью ускорителя электронов). Показана, в частности, возможность применения МУРР для определения функции распределения наночастиц по размерам в разных образцах. Примененный способ определения фрактальной размерности позволяет отличать гидрофобные порошки от гидрофильных по значениям отношения фрактальной размерности к удельной поверхности. Метод МУРР позволил установить фрактальность нанопорошков диоксида кремния, определить среднее значение их фрактальной размерности и выявить, что рассеяние рентгеновских лучей обусловлено не поверхностными, а объемными свойствами наночастиц в порошках.

*Ключевые слова:* нанопорошки, наночастицы, малоугловое рентгеновское рассеяние.

### **Введение**

Частицы с размерами менее 100 нм (наночастицы) придают материалам новые свойства. Например, нанопорошки металлов, полученные на ускорителе электронов [1; 2] путем испарения исходных материалов, обнаруживают высокие каталитические свойства [3], а нанопорошки кремния после воздействия ультрафиолетового излучения переизлучают в видимой сине-зеленой части спектра [4].

Цель данной работы – исследование возможности применения малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) для качественного и количественного анализа нанопорошков.

### **Результаты исследования**

Исследования проводились с использованием метода МУРР. Этот физический дифракционный метод – вариант рентгеноструктурного анализа кристаллов, не тре-

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта Рособразования РНП.2.1.2/541.

бующий кристаллизации образцов и позволяющий проводить анализ и научные исследования внутренней структуры и дисперсного состава веществ в материалах самых различных типов [5–7].

В работе использовались 8 образцов нанопорошков диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), из которых четыре были получены авторами на ускорителе электронов [1; 2]:

- (№ 2) T05 B06.  $S_{\text{уд}} = 50,6 \text{ м}^2/\text{г}$ , средний размер частиц  $d_{\text{ср}} = 53 \text{ нм}$ .

Особенность метода получения: в процессе испарения в воздухе мало воды, поэтому в самом веществе наночастиц и на их поверхности очень мало воды, на поверхности концентрация ОН-групп составляет порядка  $0,5/\text{нм}^2$  и менее. Этот порошок можно назвать безводным или условно гидрофобным.

- (№ 3) T15 B5.  $S_{\text{уд}} = 92,3 \text{ м}^2/\text{г}$ ,  $d_{\text{ср}} = 29 \text{ нм}$ .

Особенность метода получения: в процессе испарения в воздух специально добавляется некоторое количество воды, поэтому в самом веществе наночастиц и на их поверхности количество воды повышено, на поверхности концентрация ОН-групп порядка  $(1-2)/\text{нм}^2$ . Этот порошок можно назвать средне гидрофильным.

- (№ 4) T20.  $S_{\text{уд}} = 139,5 \text{ м}^2/\text{г}$ ,  $d_{\text{ср}} = 19 \text{ нм}$ .

Особенность метода получения: в процессе испарения в воздух добавляется существенное количество воды, поэтому в самом веществе наночастиц и на их поверхности количество воды высокое, на поверхности концентрация ОН-групп порядка  $(3-4)/\text{нм}^2$ . Этот порошок можно назвать гидрофильным или хорошо смачиваемым водой.

- (№ 5) T25 B2.  $S_{\text{уд}} = 147,8 \text{ м}^2/\text{г}$ ,  $d_{\text{ср}} = 18 \text{ нм}$ .

Особенность метода получения: в процессе испарения в воздух добавляется существенное количество воды, поэтому в самом веществе наночастиц и на их поверхности количество воды высокое, на поверхности концентрация ОН-групп также  $(3-4)/\text{нм}^2$ , но может быть и несколько более  $4/\text{нм}^2$ . Этот порошок можно назвать гидрофильным или хорошо смачиваемым водой.

Для анализа порошковые образцы помещались в плоскостенную кювету со стенками  $0,1 \text{ мм}$  и с толщиной слоя образца  $1,0 \text{ мм}$ . В качестве фонового рассеяния для образцов измерялось рассеяние от пустой кюветы. Измерения рентгенограмм МУРР

проводились в интервале  $h = (0,024 \div 0,16)^\circ$ . Для введения поправок на фоновое рассеяние измерялся также коэффициент поглощения образцом.

На рис. 1 приведены рентгенограммы МУРР, полученные от анализируемых образцов при двух геометриях съемки в координатах  $[I(h), h]$  и  $[I(h) \cdot h^4, h]$ . Здесь  $I(h)$  – интенсивность рентгеновского рассеяния,  $h = 4 \cdot \pi \cdot \sin(\theta)/\lambda$ ;  $2\theta$  – угол рассеяния;  $\lambda$  – длина волны излучения. В рентгенограммы были внесены поправки на поглощение рентгеновского излучения, коллимацию рентгеновского пучка и фоновое рассеяние.

Все измерения рентгенограмм МУРР от анализируемых образцов проводились на малоугловом рентгеновском дифрактометре совместного производства фирм «Siemens» (Германия), «Anton Paar» и «Necus-Braun» (Австрия) с малоугловой камерой Кратки с возможностью термостабилизации образцов от  $0$  до  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  с точностью до  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Использовались рентгеновские трубки с медным ( $\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 1,54 \text{ \AA}$ ) и молибденовым ( $\lambda_{\text{MoK}\alpha} = 0,71 \text{ \AA}$ ) анодами.

Характер приведенных на рис. 1 рентгенограмм МУРР для разных анализируемых образцов показал, что в первом приближении можно использовать форм-факторы близких к однородным равноосным наночастицам (отношение осей не более чем  $1 : 3$ ). Структурными моделями таких частиц в первом приближении могут являться однородные сферы [5].

Из полученных экспериментальных данных МУРР для образцов № 2–9 после процедур аппаратной коррекции были вычислены значения функций распределений наночастиц по размерам  $D_v(R)$  в образцах (как решения обратных задач рассеяния) в виде графиков (значок «v» означает, что распределение объемное или массовое) (рис. 2), а также усредненные значения некоторых интегральных структурных и дисперсных характеристик распределений наночастиц (табл. 1). Видно, что распределения наночастиц по размерам в образцах № 2–9 состоят из одной основной фракции с максимумами в интервале от  $12$  до  $17 \text{ нм}$  и с максимальными размерами от  $27$  до  $32 \text{ нм}$ . Однако нельзя исключить, что в некоторых исследуемых образцах имеются и частицы значительно большего размера (или агрегаты частиц), которые не «видны» методом МУРР.

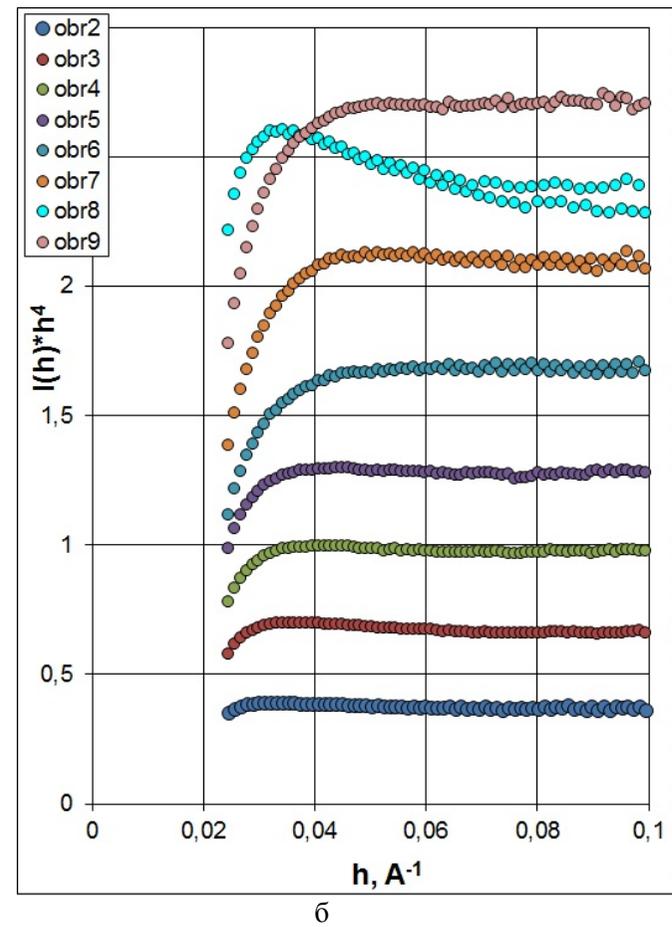
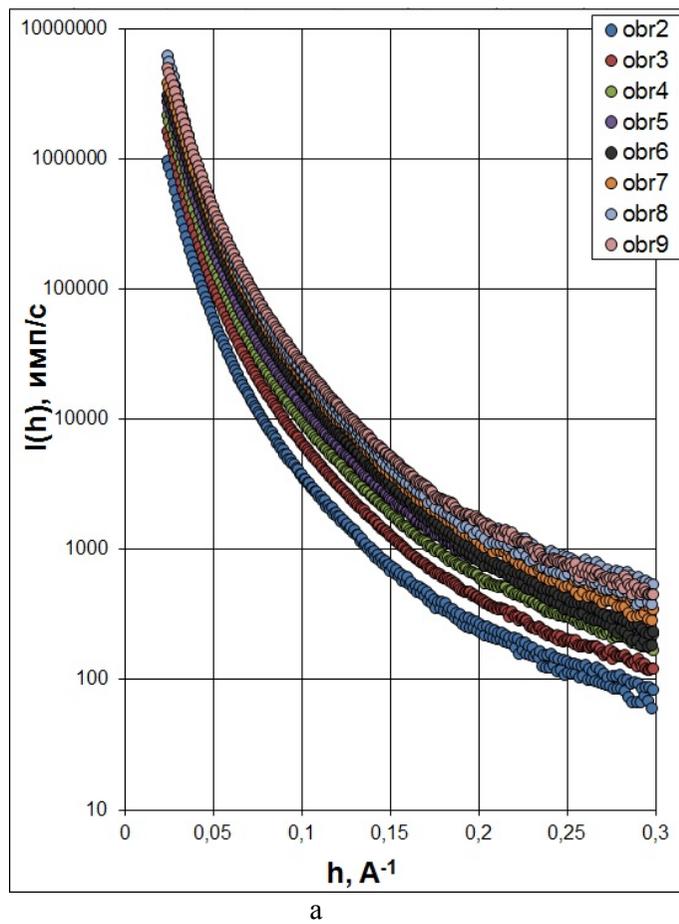


Рис. 1. Экспериментальные рентенограммы МУРР в координатах  $[I(h), h]$  (а) и  $[I(h) \cdot h^4, h]$  (б), полученные от образцов № 2–9, отличающихся технологиями приготовления

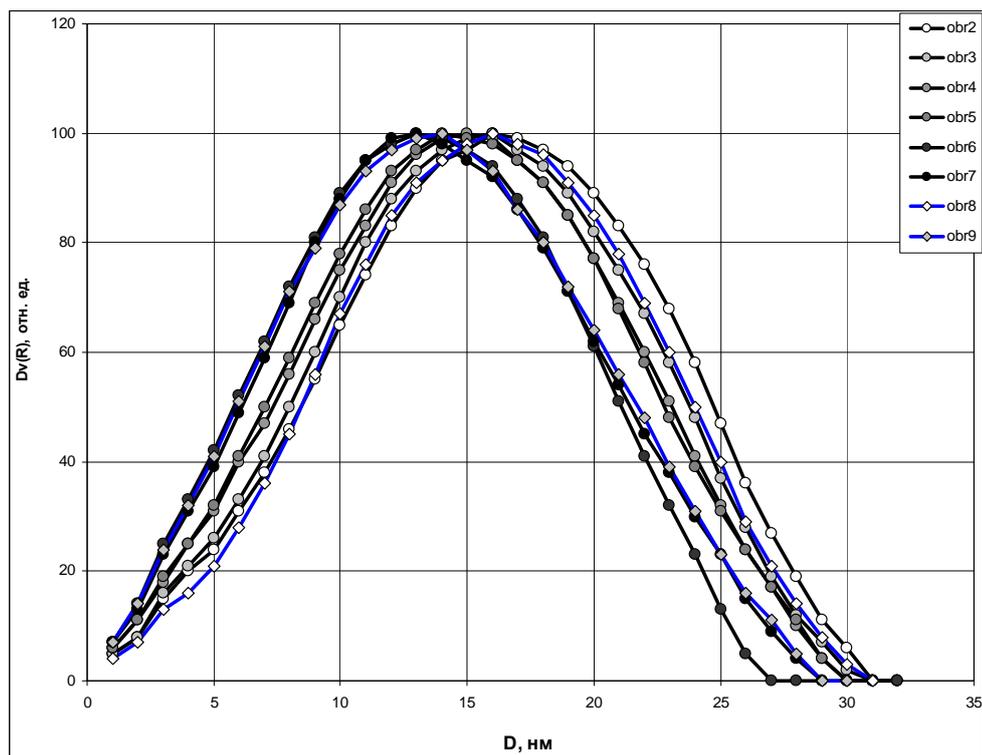


Рис. 2. Функции распределений наночастиц по размерам  $D, (R)$  в образцах № 2–9, полученные из данных МУРР

Таблица 1

Усредненные значения структурных и дисперсных характеристик наночастиц в порошковых образцах оксида кремния № 2–9, полученные методом МУРР

№ образца	Шифр образца	$l_m, \text{Å}$	$R, \text{Å}$	$R_g, \text{Å}$	МУРР		БЭТ
					$S/V, \text{м}^2/\text{см}^3$	$S/m^*, \text{м}^2/\text{г}$	$S/m, \text{м}^2/\text{г}$
2	SiO <sub>2</sub> T05 B06	123	63	85	475	206	50,6
3	SiO <sub>2</sub> T15 B5	119	60	82	496	215	92,3
4	SiO <sub>2</sub> T20	115	57	80	521	226	139,5
5	SiO <sub>2</sub> T25	114	56	80	528	229	147,8
6	SiO <sub>2</sub> A380	103	50	73	595	258	300,0
7	SiO <sub>2</sub> N20	106	52	77	575	250	200,0
8	SiO <sub>2</sub> R202	122	63	83	473	205	100,0
9	SiO <sub>2</sub> HDK	106	52	77	576	250	170,0

Примечание:  $l_m$  – корреляционная длина;  $S$  – площадь поверхности;  $V$  – объем;  $S/V$  ( $S/m$ ) – удельная поверхность;  $R$  – радиус частиц;  $R_g$  – радиус инерции наночастиц в образце [5];  $*$  – плотность частиц всех исследованных образцов полагали равной  $2,3 \text{ г}/\text{см}^3$ .

Подтверждением этого служит рис. 3, на котором приведено распределение частиц по размерам для образца № 4, определенное по фотографиям (микроскопии) образца. Средний размер частиц, определенный с помощью микроскопии ( $d_{\text{ср}} = 23 \text{ нм}$ ) больше, чем средний размер, полученный мето-

дом МУРР ( $d_{\text{ср}} = 19 \text{ нм}$ ), что приводит и к отличию в значениях удельной поверхности (соответственно 139,5 и 226  $\text{м}^2/\text{г}$ ).

Именно этим можно объяснить различия в значениях удельной поверхности, полученные методами МУРР и БЭТ, для всех образцов (см. табл. 1).

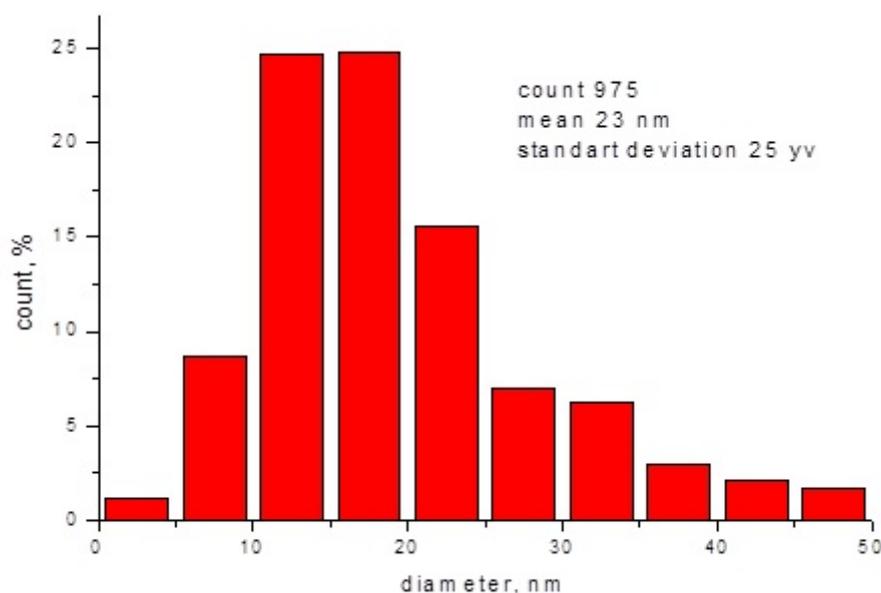


Рис. 3. Распределение частиц по размерам для образца № 4, определенное по фотографиям электронной микроскопии (ТЕМ) этого образца

Погрешности определения приведенных в табл. 1 интегральных структурных и дисперсных характеристик образцов составляют 10÷15 %.

Далее методом МУРР мы рассчитали фрактальную размерность приведенных нанопорошков и установили корреляцию между перестройкой фрактальной структуры и составом. Подобные исследования структуры и фрактальности исследуемых материалов на основе данных МУРР проведены и в работах [6; 8–20]. По результатам этих исследований с помощью метода МУРР авторы надеялись проследить за сложными процессами перестройки фрактальной структуры, например, от поверхностной к объемной.

Для вычисления фрактальной размерности образцов нами разработана компьютерная программа, которая по изображению ТЕМ проводит необходимые расчеты. Изображение разбивается на ячейки малого размера, программа определяет отдельные кластеры, нумерует их, подсчитывает площадь и периметр каждого агломерата. Методика расчета фрактальной размерности основана на линейной зависимости площади

агломерата от его периметра в двойных логарифмических масштабах. Так, например, для окружностей, квадратов, равносторонних треугольников и других многоугольников отношение периметра к квадратному корню их охватываемой площади

$$\rho = \frac{P}{S^{1/2}} = \frac{P}{\sqrt{S}} = \text{const},$$

т. е. не зависит от размера многоугольника.

Для фрактальных объектов это соотношение, как показал Мандельброт [21], меняется как

$$\rho_D = \frac{P^{1/D}}{S^{1/2}} = \text{const}.$$

Здесь  $D$  – фрактальная размерность фрактальных линий. Отношение  $\rho_D$  не зависит от размера кластера, но зависит от выбора эталона длины, т. е. от размера ячейки. При логарифмировании получается

$$\log S = C + \frac{2}{D} \log P.$$

Далее строится зависимость  $\log S$  от  $\log P$ , находится тангенс угла наклона полученной прямолинейной зависимости, по которому определяется фрактальная размерность.

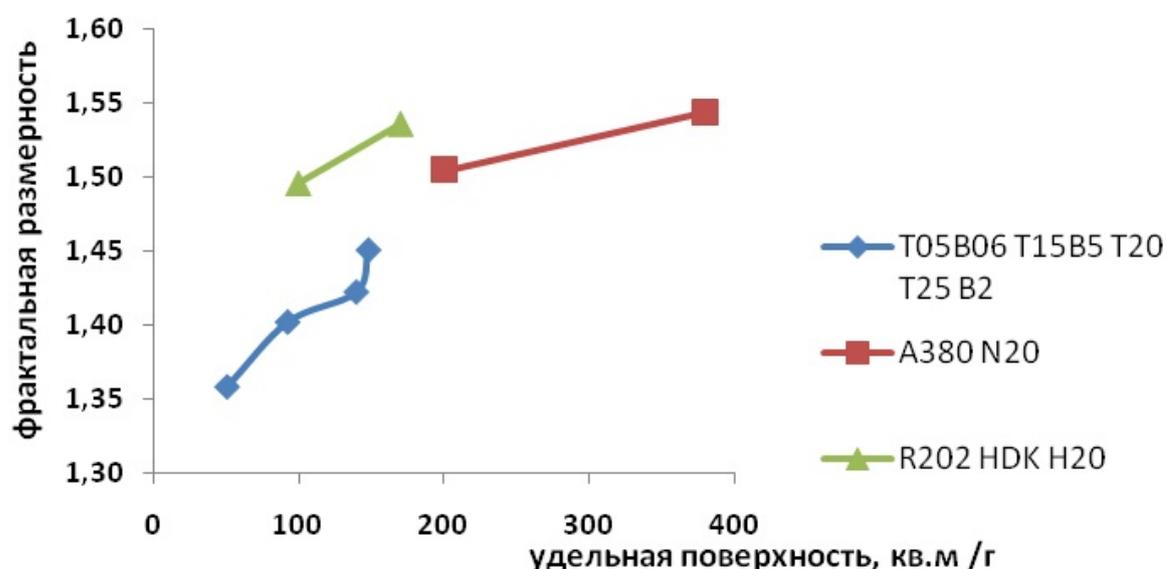


Рис. 4. Зависимость фрактальной размерности нанопорошков диоксида кремния от их удельной поверхности

Таблица 2

Значения дисперсных и фрактальных характеристик нанопорошков диоксида кремния

№	Образец	$S$ , кв.м/г	$df$	$d$ , нм	$df/S$	Конц. ОН-групп, 1/нм <sup>2</sup>	Гидрофильность – гидрофобность
1	T05B06	50,6	1,36	49,42	0,027	0,5	Условно гидрофобный
2	T15B5	92,3	1,40	41,07	0,015	1	Средне гидрофильный
3	T20	139,5	1,42	22,61	0,01	3,5	Гидрофильный
4	T25B2	147,8	1,45	18,27	0,01	3,5	Гидрофильный
5	A380	380	1,54	9,12	0,004	> 4	Гидрофильный
6	N20 Wacker	200	1,50	12,03	0,008	<b>3,5–4</b>	Гидрофильный
7	R202	100	1,50	17,76	0,015	0	Гидрофобный
8	HDK H20	170	1,54	14	0,009	> 0	Гидрофобный

Для определения фрактальной размерности нанопорошки были разделены на три группы по способу изготовления и гидрофобности. Первая группа (T05 B06, T15 B5, T20, T25 B2) – в основном гидрофильные порошки, изготовленные методом испарения – конденсации под действием электронного пучка. Вторая группа (R202, HDK H20) – гидрофобные порошки с высокой удельной поверхностью, произведены по технологии высокотемпературного гидролиза и отдельно обработанные в парах орга-

нических жидкостей. Третья группа (A380, N20) – гидрофильные порошки, произведенные по технологии высокотемпературного гидролиза.

Очевидно, что фрактальная размерность нанопорошков должна зависеть от удельной поверхности, а именно: с увеличением удельной поверхности она должна увеличиваться, что и наблюдается для всех трех групп порошков (рис. 4). Однако, как видно из рис. 4, на ее значение влияет способ изготовления нанопорошков и их «гидрофоби-

зация». Более грубая поверхность у гидрофобных порошков по сравнению с гидрофильными обуславливает более высокие значения их фрактальной размерности. Точнее влияние гидрофобности следует определять, используя отношение фрактальной размерности к удельной поверхности  $df/S$ . Так, для гидрофобных порошков второй группы (R202, HDK H20) это отношение выше, чем у порошков других групп. В табл. 2 приведены эти отношения для трех групп порошков.

Из табл. 2 следует, что в первой группе порошков, синтезированных методом испарения-конденсации под действием электронного пучка, хорошо прослеживается закономерность: отношение  $df/S$  уменьшается от 0,027 до 0,01 с увеличением концентрации ОН-групп, причем для образцов T20 и T25B2 это отношение совпадает при одинаковой концентрации ОН-групп на единицу поверхности наночастиц. На основании данных табл. 2 можно предположить, что концентрация ОН-групп для порошка N20 находится в интервале от 3,5 до 4 (эти значения выделены в таблице). Также видно, что способ получения образцов влияет на фрактальную размерность, поскольку величина  $df/S$  для порошка R202 с нулевым значением ОН-групп, равная 0,015, меньше значения 0,027 для порошка T05B06, имеющего концентрацию ОН-групп 0,5.

Таким образом, примененный в настоящей работе способ определения фрактальной размерности позволяет не только отличать гидрофобные порошки от гидрофильных по их значениям параметра  $df/S$ , которые выше для гидрофобных порошков, но также предсказывать значения концентрации ОН-групп на их поверхности.

#### **Применение малоуглового рассеяния рентгеновского излучения для определения фрактальной размерности нанопорошков диоксида кремния**

МУРР дает возможность анализа структуры дисперсных сред в диапазоне волнового вектора  $h$  от  $10^{-3}$  до  $10^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ . Согласно теории МУРР, поверхность рассеивающего объекта можно считать фрактальной, если зависимость интенсивности от угла рассеяния в двойном логарифмическом масштабе

является линейной и падение интенсивности составляет не менее 1,5–2 порядков [6; 7]. Следовательно, измерение спектров МУРР позволяет определить, является ли объект фрактальным. На рис. 4 представлена зависимость интенсивности малоуглового рентгеновского рассеяния  $I$  от волнового вектора  $h$  в логарифмических координатах.

Достоверность линейной аппроксимации высока – не меньше 0,995. Падение интенсивности МУРР составляет приблизительно 1,2 порядка. Таким образом, можно считать, что все исследуемые нами нанопорошки являются фрактальными объектами.

По прямому на рис. 5 были определены тангенсы угла их наклона  $\alpha$ . В случае, если значение  $\alpha$  находится в пределах 3–4, за рассеяние ответственна поверхностная область объекта, и фрактальная размерность вычисляется по формуле  $d = 6 - \alpha$ . В случае, если  $\alpha$  находится в пределах 0–3, рассеяние обусловлено всем объемом объекта, фрактальная размерность которого  $df_3 = \alpha$ . Так как определенные данным способом по прямому рис. 5 значения  $\alpha$  меньше 3, то они являются фрактальными размерностями ( $\alpha = df_3$ ) (табл. 3). Кроме того, в исследованных образцах МУРР обусловлено всем объемом частиц в нанопорошках.

Для получения фрактальной размерности в трехмерном пространстве  $df_3$  производится перерасчет геометрических значений  $df_2$  по формуле [22]:

$$df_3 = \left( d + df_2 \pm (d - df_2)^2 - 2 \right)^{1/2},$$

где  $d = 3$  (размерность евклидова пространства). Значение  $df_3 = 2,41$  при  $df_2 = 1,36$ . Полученное значение намного превышает значение  $df_3 = 2,1$ , определенное для нанопорошков диоксида кремния в работах [8; 23]. Поэтому воспользуемся выражением

$$df_3 = df_2 \cdot 1,5, \quad (1)$$

выведенным в [24]. Полученные значения  $df_3$  близки к значениям 2,1, что позволяет считать выражение (1) корректным. Вычисленные по формуле (1) значения  $df_3$  занесены в табл. 3. Среднее значение  $df_3$  всех порошков, определенное методом МУРР, равно 2,2, и какой-либо зависимости от степени гидрофобности не наблюдается. Это объясняется тем, что рассеяние рентгеновских лучей на исследованных образцах, как было определено выше, обусловлено всем объемом нанопорошков диоксида кремния.

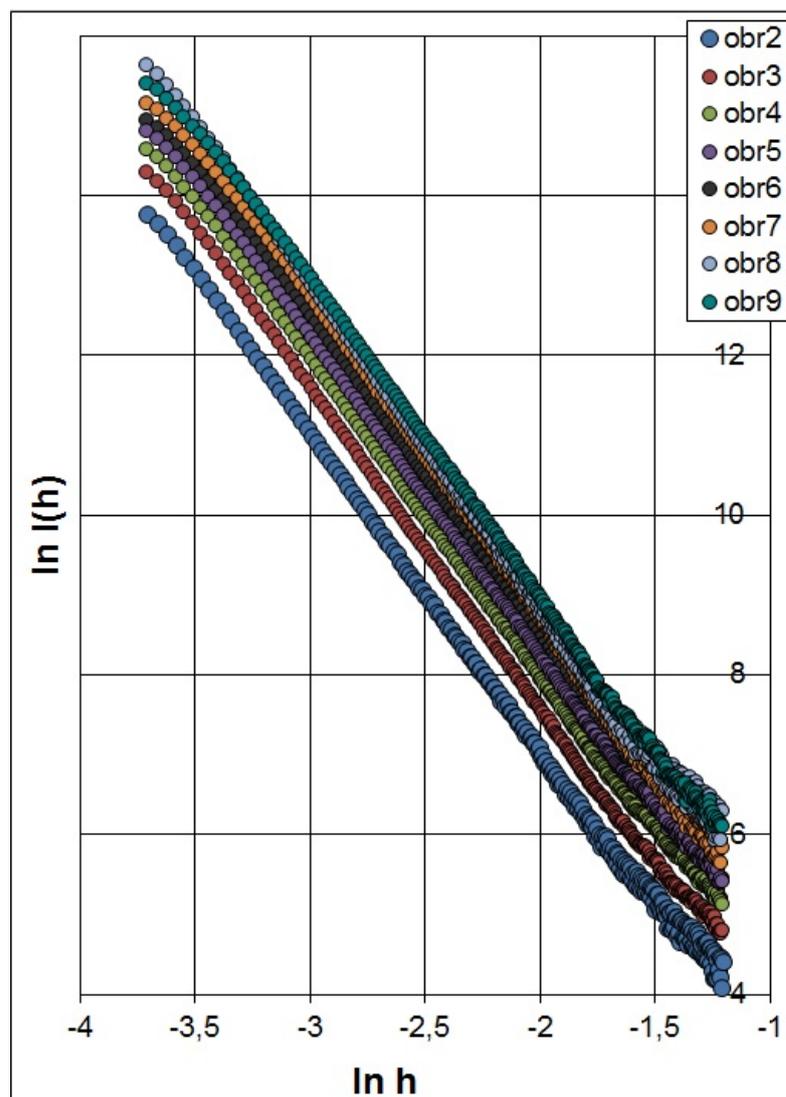


Рис. 5. Зависимость интенсивности МУРР –  $I(h)$  от волнового вектора  $h$  в логарифмических координатах

Таблица 3

Значения фрактальной размерности нанопорошков, полученных по изображениям ТЕМ и методом МУРР

№ образца	Значения фрактальной размерности		
	$df_2$ , геометрическое, по изображениям ТЕМ	$df_3$ , метод МУРР	геометрическое $\times 1,5$
2	1,36	2,153	2,04
3	1,40	2,099	2,10
4	1,42	2,115	2,13
5	1,45	2,130	2,18
6	1,54	1,969	2,31
7	1,50	2,062	2,25
8	1,50	2,100	2,25
9	1,54	2,098	2,31

## Заключение

Исследована возможность применения метода малоуглового рентгеновского рассеяния для качественного и количественного анализа нанопорошков. Работы проведены на восьми порошках диоксида кремния (в том числе на четырех, полученных авторами с помощью ускорителя электронов). Показана возможность применения МУРР для определения функции распределения наночастиц по размерам в разных образцах.

Примененный способ определения фрактальной размерности позволяет отличать гидрофобные порошки от гидрофильных по значениям отношения их фрактальной размерности к удельной поверхности.

Таким образом, метод МУРР позволил определить фрактальность нанопорошков диоксида кремния, оценить среднее значение их фрактальной размерности, выявить, что рассеяние рентгеновских лучей обусловлено не поверхностными, а объемными свойствами нанопорошков.

## Список литературы

1. Лукашов В. П., Бардаханов С. П., Салимов Р. А., Корчагин А. И., Фадеев С. Н., Лаврухин А. В. Способ получения ультрадисперсной двуокиси кремния, устройство для его осуществления и ультрадисперсная двуокись кремния // Патент РФ № 2067077. 1996. Бюл. № 27.
2. Бардаханов С. П., Корчагин А. И., Куksанов Н. К., Лаврухин А. В., Салимов Р. А., Фадеев С. Н., Черепков В. В. Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении // ДАН. 2006. Т. 409, № 3. С. 320–323.
3. Korchagin A. I., Kuksanov N. K., Lavrukhin A. V., Fadeev S. N., Salimov R. A., Bardakhanov S. P., Goncharov V. B., Suknev A. P., Paukshtis E. A., Larina T. V., Zaikovskii V. I., Bogdanov S. V., Bal'zhinimaev B. S. Production of Silver Nano-Powders by Electron Beam Evaporation // Vacuum. 2005. Vol. 77. Is. 4. P. 485–491.
4. Ефремов М. Д., Володин В. А., Марин Д. В., Аржанникова С. А., Горяинов С. В., Корчагин А. И., Черепков В. В., Лаврухин А. В., Фадеев С. Н., Салимов Р. А., Бардаханов С. П. Видимая люминесценция нанопорошков кремния, созданных испарением кремния мощным электронным пучком // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 80, вып. 8. С. 619–622.
5. Свергун Д. И., Фейгин Л. А. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. М.: Мир, 1986. С. 68–72.
6. Свергун Д. И., Волков В. В., Козин М. Б. Автоматическое определение формы частиц в малоугловом рассеянии малодисперсными системами // Поверхность. 1999. № 9. С. 3–6.
7. Малоугловая рентгеновская дифрактометрия: Учеб.-метод. пособие к лаб. практикуму «Наноструктурный анализ веществ и материалов» / Ф. В. Тузиков и др. Новосибирск, 2009. 48 с.
8. Саврасова Н. А. Фрактальный анализ наноструктур аморфных пленок на основе данных дифракции электронов и рентгеновских лучей: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Воронеж, 2000. 133 с.
9. Schaefer D. W., Martin J. E., Wiltzius P. Fractal Geometry of Colloidal Aggregates // Phys. Rev. Lett. 1984. Vol. 52. P. 2371–2374.
10. Скатков Л. И., Конотоп В. В., Черемской П. Г., Гомозов В. П., Байрамный Б. И. Исследование поверхностных структурных неоднородностей твердого тела: фрактальные свойства // Поверхность. Физика, химия, механика. 1993. № 6. С. 129–131.
11. Исупов В. А. Природа фрактальных образований на поверхности сегнетоэлектрических кристаллов с размытым фазовым переходом // ФТТ. 1998. Т. 40, № 7. С. 1305–1306.
12. Камзина Л. С., Крайник И. И., Корженевский А. Л. Фазовый переход перколяционного типа в кристаллах цинкониобата свинца в электрическом поле // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 56, вып. 10. С. 532–535.
13. Камзина Л. С., Корженевский А. Л., Коришунов О. Ю. Возникновение крупномасштабных неоднородных состояний при индуцированном электрическим полем фазовом переходе в кристаллах магнониобата свинца // ФТТ. 1995. Т. 37, № 9. С. 2765–2770.
14. Богданов С. Г., Валиев Э. З., Пирогов А. Н. Фрактальная структура углеродных волокон // Письма в ЖЭТФ. 1992. Т. 56, вып. 5. С. 254–256.
15. Кобелев В. Л., Кобелев Л. Я., Кобелев Я. Л. О зависимости фрактальной размерности поверхности растущего сегнетоэлектрического кристалла от времени роста // Поверхность. 1999. № 4. С. 42–46.

16. *Grassberger P.* Generalized Dimensions of Strange Attractors // *Phys. Rev. Ser. A.* 1983. Vol. 27. P. 227–230.

17. *Байдакова М. В., Вуль А. Я., Сиклицкий В. И., Фалеев Н. Н.* Фрактальная структура кластеров ультрадисперсного алмаза // *ФТТ.* 1998. Т. 40. С. 776–780.

18. *Baidakova M. V., Siklitsky V. I., Vul A. Ya.* Ultradisperse Diamond Nanoclusters // *Fractal Structure and Diamond-Graphite Phase Transition.* Chaos, 1999. Vol. 10. P. 2153–2163.

19. *Фомичева Е. Е., Темнов Д. Э., Смирнов А. В., Федоров Б. А.* Влияние дисперсионного наполнителя на основе алюминия на структуру и свойства полипропилена // *Науч.-техн. вестн. С.-Петерб. ГУИТМО.* 2009. № 6 (64). С. 59–65.

20. *Стрижак П. Е., Трипольский А. И., Гурник Т. Н., Тузиков Ф. В., Мороз Э. М., Константинова Т. Е., Тузикова Н. А., Колько В. П., Даниленко И. А., Горбань О. А.*

Влияние температуры на структурные характеристики наночастиц диоксида циркония, полученных при условиях СВЧ-воздействия // *Теоретическая и экспериментальная химия.* 2008. Т. 44, № 3. С. 138–143.

21. *Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. М.; Ижевск, 2010. 656 с.

22. *Vicsek T.* Pattern Formation in Diffusion-Limited Aggregation // *Phys. Rev. Lett.* 1984. Vol. 53. P. 2281–2284.

23. *Schafer D. W., Martin J. E., Wiltzuis P.* Fractal Geometry of Colloidal Aggregates // *Phys. Rev. Lett.* 1984. Vol. 52. P. 2371–2374.

24. *Dobrescu G., Balabanova E., Zaharescu M., Ionescu N. I.* Tem Micrograph Fractal Analysis of Silica Powders // *Revue Roumanie de Chimie.* 2008. Vol. 53 (3). P. 217–221.

*Материал поступил в редколлегию 03.02.2012*

**S. P. Bardakhanov, L. S. Vikulina, V. I. Lysenko, A. V. Nomoev  
S. A. Poluyanov, F. V. Tuzikov**

**ANALYSIS OF NANOPOWDERS  
BY SMALL-ANGLE X-RAY SCATTERING METHOD'S**

The possibility of application of small-angle X-ray scattering (SAXS) for nanopowders analysis was studied. The research for eight silica powders (including four powders obtained by the authors with help of electron accelerator) was conducted. The possibility of application of small angle X-ray scattering for determination of size distribution function of nanoparticles was shown.

*Keywords:* nanopowders, nanoparticles, small-angle X-ray scattering.