

23. Harry J., Beattie Jr. Close-Packed Structures. Intermetallic Compounds. Ed. by Westbrook. Blew York, London Sydney.- 1968.-P.144-165.
24. Beck P.A., Possible Close-Packed Ordered Structures Related to MoNi<sub>4</sub>. Acta Cryst. 1968. B.24. P.1447-1481.
25. Кривоглаз М.А., Смирнов А.А. Теория упорядочивающихся сплавов. М.: ФМЛ, 1958. С. 308.
26. Ling Fu. Wen, Starke E.A. The Disorder – Order Transformation in Ni<sub>4</sub>Mo // Advances in X-Ray Analysis. 1972. V.15. P. 319-329.
27. Ling Pu. Wen, Starke E.A. The Development of Long-Range Order and the Resulting Strengthening Effects in Ni<sub>4</sub>Mo. Acta Met. 1971. V.19, N8. P.759-768.
28. Джеймс Р. Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей. М.:ИЛ. 1950. 572 с.
29. Warren B. X-Ray Diffraction. Addition. Warley. New York. 1969.
30. Chipman D.R. X-ray Study of the Local Atomic Arrangement in Partially Order Cu<sub>3</sub>Au. J.Appl. Phys. 1956. V.27. P.739-746
31. Chipman D.R., Paskin A. Temperature Diffuse Scattering of X-ray's in Cubic Powders II. Conection Integrated Intensity Measurements. J.Appl.Phys. 1959. V.30 P.1998-2001
32. Zachariasen W.H./Experimental Test of the General Formula for the Integrated Intensity of a Real Crystals. Acta.Cryst. 1968. V.A24. N1. P.212-216
33. Chandrasenkhar S.Experimental Method of Correcting for Extinction in Crystals. Acta.Cryst. 1960. V.13.N8. P.588-594
34. Reehinger W.A. A Correction for  $\alpha_1, \alpha_2$  Doublet in the Measurement of Widths of X-Ray Diffraction Lines. J. Scient. Instr. 1948.V.25. P.254-255.
35. Ellinger P. N. The Nickel-Molybdenum System. Transaction of the Am. Soc. Metals.-1942. V.30. P.607-638.
36. Heigwegen P., Reick G.D. Determination of the Phase Diagram of the Molybdenum-Nickel System Using Diffusion Copies and Equilibrated Alloys. Z. Metallkunde. 1973. Bd.64, №.6. S.450-453
37. Casselton R.E.W., Hume-Rothery V. The Equilibrium Diagram of the System Molybdenum-Nickel // Journal of the Less Common Metals. 1964. V.7. P.212-221.

#### Сведения об авторах

Козлов Эдуард Викторович, д.ф.-м.н.. профессор, заведующий кафедрой «Физика», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная 3, г. Томск, 634003 Россия, +7(3822) 65-42-65, e-mail: kozlov@tsuab.ru

Клопотов Анатолий Анатольевич, д.ф.-м.н.. профессор, профессор каф. «Прикладная математика и материаловедение» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная 3, г. Томск, 634003 Россия, +7(3822) 65-07-23 e-mail: klopotovaa@tsuab.ru

Потекаев Александр Иванович, д.ф.-м.н.. профессор, Директор Сибирский физико-технический институт Томский государственный университет, ул. Ленина 36, г. Томск, 634050, Россия, +7(3822) 65-07-23 e-mail: klopotovaa@tsuab.ru

Маркова Татьяна Николаевна, аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная 3, г. Томск, 634003 Россия, +7(3822) 65-07-23, e-mail: klopotovaa@tsuab.ru

Поробова Светлана Александровна, магистр, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная 3, г. Томск, 634003 Россия, +7(3822) 65-32-65, e-mail: porobova.sveta@yandex.ru

Волокитин Олег Геннадьевич, к.т.н., доцент, доцент каф. «Прикладная математика и материаловедение» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная 3, г. Томск, 634003 Россия, +7(3822) 65-04-78, e-mail: volokitin\_oleg@mail.ru

Клопотов Владимир Дмитриевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры Высшей математики Томский политехнический университет, Россия, г. Томск, ул. Ленина 30, 634050, +7(3822) 65-07-23, e-mail: klopotovaa@tsuab.ru

УДК 538.911: 538.915

doi: 10.18.101/978-5-9793-0883-8-167-173

## Дифференциация наночастиц через фрактальную размерность

Сызранцев В. В.<sup>1,2\*</sup>, Викулина Л. С.<sup>1</sup>, Бардаханов С. П.<sup>1,2</sup>, Номоев А. В.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Бурятский государственный университет, г. Улан-Удэ, ул. Смолина 24а, Россия, 670000

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, Россия, 630090

<sup>3</sup>Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия, 670047

\*e-mail: vvveliga@mail.ru

#### Аннотация

Проведен сравнительный анализ наночастиц одного химического состава, но разного метода синтеза методами позволяющими определить структуру наночастиц и их поверхностные свойства. Показано, что структурные свойства наночастиц в значительной степени определяются методом их синтеза, что вероятно связано с условиями формирования их кластеров.

Предложено использовать величину фрактальной размерности как базовый параметр для определения различности наночастиц и особенностей их взаимодействия с материалами. Показана взаимосвязь между величиной фрактальной размерности наночастиц трех оксидов и методами их синтеза. Показано, что величина фрактальной размерности линейно зависит от величины удельной поверхности для наночастиц одного метода их синтеза, однако изменение обусловленное изменением метода синтеза более существенно.

На примере вязкости наножидкостей и адгезии полимеров показано, что взаимодействие наночастиц со средой имеет аналогичную особенность.

**Ключевые слова** наночастицы, кластер, фрактальная размерность, свойства поверхности

## Differentiation of Nanoparticles Through Fractal Dimension

Syzrantsev V. V.<sup>1,2\*</sup>, Vikulina L. S.<sup>1</sup>, Bardakhanov S. P.<sup>1,2</sup>, Nomoev A. V.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Buryat State University, Ulan-Ude, Smolin Str. 24a, Russia, 670000

<sup>2</sup>Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Institutskaya Str. 4/1, Novosibirsk, Russia, 630090

<sup>3</sup>Institute of Physical Material Science SB RAS, Ulan-Ude, Sakhyanova Str., Russia, 670047,

\*e-mail: vvveliga@mail.ru

### Abstract

Comparative analysis of the nanoparticles with the same chemical composition, but of a different method of synthesis has been conducted by methods allowing determining the structure of nanoparticles and their surface properties. It is shown that the structural properties of nanoparticles are exclusively determined by their synthesis due to the conditions of formation of clusters.

It is proposed to use the value of the fractal dimension as the basic parameter to determine various characteristics of the nanoparticles and their interaction with materials. The correlation of the value of the fractal dimension of the nanoparticles of three oxides and methods for their synthesis has been achieved. It was shown that the fractal dimension value is linearly dependent on the specific surface area value at one method of nanoparticle origin. However, the alteration of the origin method caused the fractal dimension value to change more significantly.

For example, investigation of the viscosity of nanofluids and adhesion of polymers showed the interaction of nanoparticles with media produce a similar behavior.

**Keywords:** nanoparticles, clusters, fractal dimension, surface properties

### Введение

Наночастицы являются распространенным классом неорганических материалов, и хотя их свойства в значительной мере изучены, мало кто обращает внимание, что ряд характеристик наночастиц при сохранении химического состава является уникальным и определяется условиями синтеза [1-3]. Свойства их высокоразвитой поверхности, включая содержание различных функциональных групп, и их неоднородность являются важнейшими факторами, определяющими эффективность их применения.

Метод синтеза и его условия определяют характер взаимодействия атомов, порядок и условия их объединения при формировании наночастиц. Особенности формирования могут возникнуть как на начальной стадии (нуклеации) образования молекулярных кластеров так и на этапе их роста или объединения в наночастицы [4]. При достаточной большой концентрации образованных кластеров происходит их коагуляция и перестроение, что приводит к уменьшению поверхностной энергии, выделению тепла, и формированию новой системы - фрактальных кластеров.

На всех этих этапах формирование кластеров может происходить при различных условиях. Решающую роль в процессе роста частиц играет скорость отвода теплоты конденсации при взаимодействии с охлаждающим газом [5].

Численное моделирование [6-8] показывает, что вариации в условиях формирования кластеров отражаются на величине фрактальной размерности. В газовой фазе основными параметрами являются температура, скорость охлаждения и свойства материала кластера и охлаждающего газа. В жидкой фазе, в частности в растворах, появляются также параметры концентрации раствора, pH среды, наличие ПАВ.

Например, изучение фрактальных кластеров Co, полученных при конденсации в атмосфере аргона при давлении около 1.33 кПа, показало, что средний размер и фрактальная размерность зависят от давления аргона [6]. Так, при давлении аргона 0.1 – 1.0 кПа получались частицы с  $d_{\text{средн}}=16$  нм и  $D = 1.75-1.90$ . Рост давления аргона приводил к синтезу частиц с большим средним размером и  $D = 1.90-2.05$ .

При замене инертного газа на вакуум фрактальная размерность уменьшается до  $D = 1.75-1.85$ . Для образования фрактальных кластеров большое значение имеет и способ испарения материала. Так, фрактальная размерность агрегатов Fe и Ti, синтезированных в паро-плазменной области под действием лазера, составляет 1.8 [9], а в случае испарения металла методом электрического взрыва проводников — 1.6 [10].

Можно утверждать, что фрактальная размерность чувствительна к условиям формирования кластеров и в дальнейшем может быть использована для дифференциации наночастиц имеющих одинаковый химический состав, но различную структуру и, как следствие, взаимодействующих с макро-средой (жидкостями, полимерами, воздухом и т.п.) с различной интенсивностью.

Целью работы явилось получение значений фрактальной размерности для наночастиц SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, полученных методически близкими газофазными способами; выявить различия во фрактальной размерности и связь их с особенностями взаимодействия наночастиц с материалами, в которые они допированы.

### Материалы и методы

Для измерения фрактальной размерности и её анализа были отобраны наночастицы трех наиболее доступных оксидов SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, синтезированных различными методами:

SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> полученные путем испарения материала электронным пучком (серии Ts, Ta, Tt) [11]; коммерческие порошки SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> полученные методом высокотемпературного пламенного гидролиза (серии As, Aa, At) (Evonik Industries (Германия)); SiO<sub>2</sub>, плазменно-дуговым методом (данные опубликованы в [12]) (серия Ps); коммерческие порошки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> АКР50, полученные методом гидролиза алкооксида алюминия (Sumitomo Chemical (Япония)) (серия Sa); коммерческие порошки TiO<sub>2</sub>, полученные методом химического осаждения (NanoChemical Inc., (Korea)) (серия Kt). Распределение частиц по размеру и величина удельной поверхности порошков определялись по результатам просвечивающей электронной микроскопии (JEOL-2010, (Япония)) и адсорбционным методом БЭТ (Sorbi-M, Россия).

Для вычисления фрактальной размерности образцов разработана компьютерная программа, которая по изображению ПЭМ проводит необходимые расчеты [13]. 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 охватываемой площади постоянно. Для фрактальных объектов [14] это соотношение, меняется как

$$\rho^D = P^{1/D}/S^{1/2} = \text{const}$$

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  $\log S = C + 2/D * \log P$

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

Для получения фрактальной размерности в трехмерном пространстве  $D3$  производится перерасчет геометрических значений в двумерном пространстве  $D2$  по формуле  $D3 = 1.5 * D2$ , выведенной в [12].

В качестве погрешности представлено значение среднеквадратичного отклонения при аппроксимации полученных величин фрактальной размерности.

### Результаты и обсуждение

Значения фрактальной размерности, рассчитанные для наночастиц SiO<sub>2</sub>, приведены в табл. 1 и отображены на рис. 1.

Таблица 1

Значения дисперсных и фрактальных характеристик нанопорошков диоксида кремния

№	Образец	$S$ , кв.м /г	$d_{\text{средн}}$ , нм	$D2$	Погрешность	$D3$
1	Ts50	50	49.42	1.36	0.02	2.04
2	Ts90	92	29.55	1.40	0.03	2.10
3	Ts140	140	19.55	1.42	0.03	2.13
4	Ts150	150	18.45	1.45	0.03	2.18
5	As380	380	7.18	1.54	0.002	2.31
6	As300	300	9.09	1.52	0.002	2.28
7	As200	200	13.64	1.50	0.002	2.25
8	As90	90	30.30	1.47	0.002	2.21
9	Ps53	53	51.46	1.88	0.01	2.82
10	Ps400	400	6.82	1.93	0.01	2.90

Как видно из рис. 1, для всех трех групп порошков с увеличением удельной поверхности фрактальная размерность увеличивается, по закону близкому к линейному (рис. 1). В то же время значительно существеннее на величину фрактальной размерности влияет способ изготовления нанопорошков.

Для наночастиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> фрактальная размерность, представленная в табл. 2 и на рис. 2, имеет в целом аналогичный вид. При изменении удельной поверхности для наночастиц одного типа величина фрактальной размерности зависит от величины удельной поверхности по закону близкому к линейному. При изменении метода синтеза наночастиц, фрактальная размерность изменяется значительно сильнее.

Аналогично поведение величины фрактальной размерности для наночастиц TiO<sub>2</sub>, представленной в табл. 3. При приблизительном постоянстве удельной поверхности наночастиц разного происхождения они имеют значительные отличия величины фрактальной размерности.

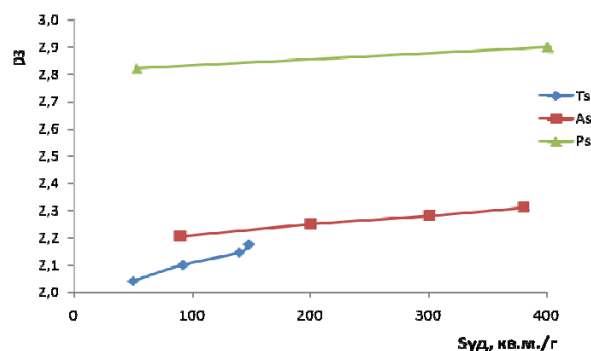


Рис. 1. Зависимость фрактальной размерности  $D_3$  нанопорошков  $\text{SiO}_2$  от величины их удельной поверхности и метода синтеза наночастиц.

Таблица 2

Значения дисперсных и фрактальных характеристик нанопорошков оксида алюминия

№	Образец	$S$ , кв.м./г	$d_{\text{средн}}$ , нм	$D_2$	Погрешность	$D_3$
1	Ta	40	37.5	1.59	0.03	2.39
2	Ta	53	28.3	1.61	0.03	2.42
3	Ta	114	13.16	1.68	0.03	2.52
4	Aa	130	11.54	1.74	0.003	2.61
5	Aa	100	15.0	1.73	0.003	2.60
6	Aa	65	23.1	1.71	0.003	2.57
7	Sa	7.5	200	1.85	0.002	2.78

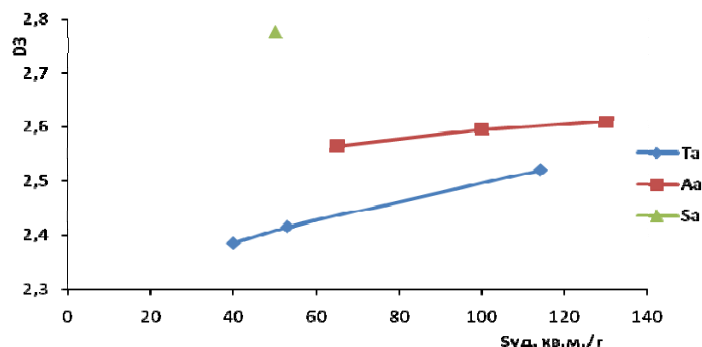


Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности  $D_3$  нанопорошков  $\text{Al}_2\text{O}_3$  от величины их удельной поверхности и метода синтеза наночастиц

Таблица 3

Значения дисперсных и фрактальных характеристик нанопорошков диоксида титана

№	Образец	$S$ , кв.м./г	$d_{\text{средн}}$ , нм	$D_2$	Погрешность	$D_3$
1	Tt	42	34.84	1.74	0.03	2.61
2	At	50	29.27	1.98	0.003	2.97
3	Kt	50	29.27	1.9	0.003	2.85

Если обобщить представленные выше данные для всех наночастиц, то оказывается, что наночастицы произведенные методом испарения материала пучком электронов имеют значительно меньшую величину фрактальной размерности (2.3 – 2.6), чем наночастицы полученные другими методами. Наибольшее значение фрактальной размерности, часто вблизи предельной величины, демонстрируют наночастицы произведенные химическими и плазмохимическими методами. Наночастицы полученные пирогенным методом имеют промежуточные величины, диапазон которых (2.3 - 2.97) существенно меняется от типа синтезируемого вещества. Это может быть связано с тем, что для этой технологии при изменении синтезируемого вещества заметно изменяются условия синтеза, что приводит к, как будет показано далее, изменению локализации атомов.

Таким образом, величина фрактальной размерности наночастиц может быть использована как базовый параметр для определения различности наночастиц и особенностей их взаимодействия с материалами, примеры которых будут представлены далее.

Взаимосвязь между фрактальной размерностью и структурой наночастиц можно проследить на примере ИК-спектроскопии. Образцы *S-1*(Ts120), *S-2*(As90) были изучены методикой диффузного отражения на спектрометре Shimadzu FTIR-8300 оборудованном приставкой диффузного отражения DRS-8000 с разрешением  $4\text{ см}^{-1}$  в диапазоне  $400\text{-}6000\text{ см}^{-1}$  (накопление 100 спектров).

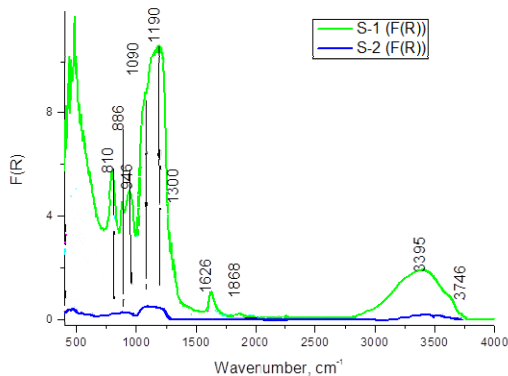


Рис.3. ИК спектры диффузного отражения образцов *S-1*(Ts120), *S-2*(As90)

В ИК-спектрах обоих образцов наблюдаются интенсивные полосы поглощения в области  $400\div 1200\text{ см}^{-1}$ , обусловленные колебаниями Si-O связей. Полосы в области  $1090\text{-}1300\text{ см}^{-1}$  относятся к антисимметричным валентным колебаниям тетраэдров  $\text{SiO}_4$ , а полоса около  $450\text{ см}^{-1}$  к симметричному колебанию этого же фрагмента. Полоса  $810\text{ см}^{-1}$  относится к деформационным колебаниям Si-O-Si. Кроме того обнаружены полосы  $886$  и  $946\text{ см}^{-1}$ , природа которых неясна. Это могут быть деформационные колебания Si-OH или колебания напряженных мостиков фрагментов Si-O-Si ( $\text{Si}=\text{O}_2=\text{Si}$ ).

В области  $3000\div 3700\text{ см}^{-1}$  расположены широкие структурированные полосы валентных колебаний O-H связей, в области  $1600\div 1650\text{ см}^{-1}$  деформационные колебания этих связей. Структурированный характер полос поглощения  $\text{H}_2\text{O}$  свидетельствует о разных типах воды в исследуемых соединениях - как структурной, так и поглощенной из воздуха.

Методом радиоэлектронной спектроскопии (РЭС) проведен анализ энергетического положения рентгеноэлектронных линий в спектре и получена информация об энергиях связи основных электронном и о зарядовых состояниях атомов.

Исследования проведены на рентгенофотоэлектронном спектрометре VQ Microtech (Англия), энергия линии  $\text{AlK}\alpha$   $1486,6\text{ эВ}$ . Исследовались спектры внутренних уровней Si2p и O1s. Были получены также оже-спектры для атома кремния и измерены кинетические энергии оже-электронов SiKLL. Калибровку спектров проводили по 1s линии углерода, для которой было принято значение энергии связи  $284,6\text{ эВ}$ .

В таблице 2.1 приведены значения полученных сдвигов линий относительно природного кварца. Как видно, масштаб изменения сдвигов является заметным. Поэтому для выявления тенденции в поведении сдвигов мы рассмотрели взаимосвязь между величинами  $\Delta\text{O1s}$  и  $\Delta\text{Si2p}$ , а также  $\Delta\text{SiKLL}$  и  $\Delta\text{Si2p}$ .

Таблица 4

Энергетические сдвиги внутренних O1s и Si2p линий и линий в оже-спектрах SiKLL относительно природного кварца в образцах белых саж, эВ

Образец	$\Delta\text{Si2p}$	$\Delta\text{O1s}$	$\Delta\text{SiKLL}$
Силикатные минералы	-0.2	-0.5	-0.1
Ts - 96	0.3	0.4	-0.5
As-380	0.9	1.0	-1.3

Результаты такого сопоставления приведены в таблице 4. В работе [15], анализируя табличные данные, авторы отмечали, что по мере усложнения типа радикала, т.е. увеличения степени конденсации кремнекислородных тетраэдров, происходит смещение O1s уровня и Si2p уровня в сторону больших энергий связи.

Из таблицы 4 видно, что совместный сдвиг значений Si2p и O1s для наночастиц также присутствует, но в области более высоких значений энергии связи, чем у силикатных минералов. Нужно отметить, что практически все силикатные минералы имеют отрицательные сдвиги по сравнению с природным кварцем, а наночастицы как отрицательные, так и положительные. При этом диапазон изменения сдвигов достигает 1 эВ. Наблюдаемое поведение энергии связи Si2p и O1s-электронов для наночастиц можно связать с тем, что они в сравнении с природным кварцем имеют как аморфную структуру, так и высокую развитую удельную поверхность, содержащую инородные молекулы примеси: гидроксильные группы, метильные группы и т.д. В тоже время существенным является и расхождение в величинах для наночастиц Ts и As.

На практике выявленные выше особенности строения наночастиц приводят к изменению интенсивности взаимодействия наночастиц с окружающей средой. То есть, наночастицы, имеющие одинаковый состав, но произведенные разными методами и следовательно имеющие разную фрактальную размерность, взаимодействуют с дисперсионной средой с разной интенсивностью. В частности в работе [1] показано, что наночастицы типа As приносят значительно большую вязкость в полимеры и воду, чем наночастицы типа Ts. Этот эффект представлен на рисунке 5, который был опубликован в работе [1] и в целом соответствует зависимости фрактальной размерности (рис. 1).

Рисунок 6 показывает аналогичный эффект на величине модуля Юнга, полимеризованной эпоксидной смолы содержащей наночастицы (опубликован в работе [16]). Он определяется величиной адгезии наночастиц и молекул смолы. Видно, что максимальный эффект воздействия для образцов As возникает при концентрации 0.5%, а для образцов Ts при концентрации 1%, что говорит о различии распределений силы адгезии в полимере содержащем наночастицы различного происхождения.

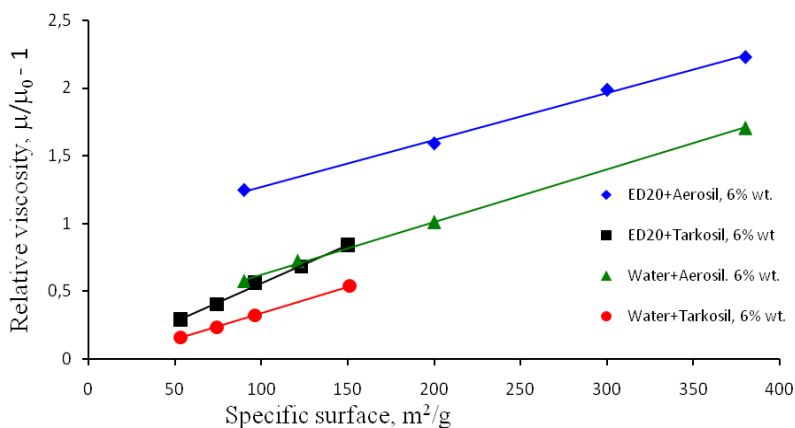


Рис. 5. Зависимость относительных вязкостей смолы ЭД-20 и воды от величины удельной поверхности порошков Таркосил (Ts) и Аэросил (As). C= 6 % wt

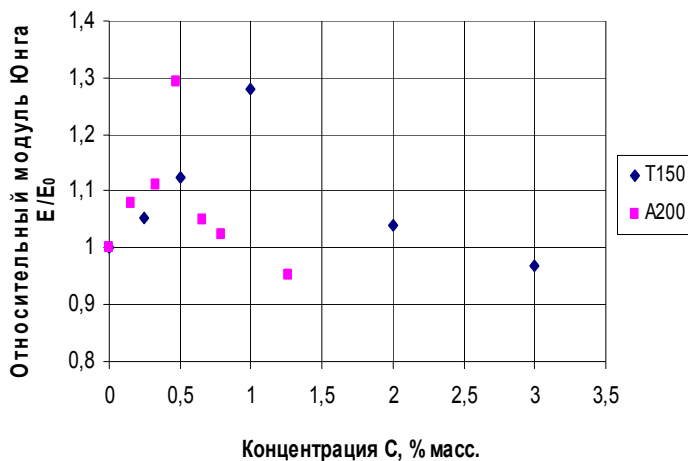


Рис. 6. Зависимости относительного модуля Юнга для композитов на основе смолы ЭД-22 с наполнителями Ts150 и As200 от их концентрации.

## Выводы

Проведен сравнительный анализ наночастиц одного химического состава, но разного метода синтеза методами позволяющими определить структуру наночастиц и их поверхностные свойства. Показано, что структурные свойства наночастиц в значительной степени определяются методом их синтеза, что вероятно связано с условиями формирования их кластеров.

Предложено использовать величину фрактальной размерности как базовый параметр для определения различности наночастиц и особенностей их взаимодействия с материалами. Показана взаимосвязь между величиной фрактальной размерности наночастиц трех оксидов и методами их синтеза. Показано, что величина фрактальной размерности линейно зависит от величины удельной поверхности для наночастиц одного метода их синтеза, однако изменение обусловленное изменением метода синтеза более существенно.

На примере вязкости наножидкостей и адгезии полимеров показано, что взаимодействие наночастиц со средой имеет аналогичную особенность.

Работа выполнена в рамках проектной части Государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 16.1930.2014/К.

## Литература

1. Syzrantsev V.V., Zavyalov A.P., Bardakhanov S.P., The role of associated liquid layer at nanoparticles and its influence of nanofluids viscosity // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. V.72. (2014). P. 501-506.
2. Bardakhanov S.P., Vasiljeva I.V., Kuksanov N.K., Mjakin S.V. Surface functionality features of nanosized silica obtained by electron beam evaporation at ambient pressure // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2010. Article ID 241695, 5p., doi:10.1155/2010/241695. – Hindawi Publishing Corp.
3. Шека Е.Ф., Хаврюченко В.Д., Маркичев И.В. Технологический полиморфизм дисперсных аморфных кремнеземов: неупругое рассеяние нейтронов и компьютерное моделирование. *Успехи химии* 64 (5), 1995, С. 419 - 444.
4. Ген М.Я., Петров Ю.И. Дисперсные конденсаты металлического пара – *Успехи химии*, 1969, 38 (12), С. 2249-2278.
5. Петров Ю.И., *Физика малых частиц*. М.: Наука, 1982. С. 360.
6. Niklasson G.A. Torebring A., Larsson C. et al. Fractal dimensions of gas-evaporated Co aggregates: role of magnetic coupling // *Phys. Rev.Lett.* 1988. Vol. 60. P. 1735.
7. Meakin P. J. The effects of random bond breaking on diffusion limited cluster-cluster aggregation // *Chem. Phys.* 1985. V.83, No 7. PP. 3645-3649.
8. Meakin P. J., Jullien R., The effects of restructuring on the geometry of clusters formed by diffusion-limited, ballistic, and reaction-limited cluster – cluster aggregation // *Chem. Phys.* 1988. V.89, No1. PP. 246-250.
9. Лушников А.А., Пахомов А.В., Черняева Г.А. Фрактальная размерность агрегатов, образующихся при лазерном испарении металлов. *Докл. АН СССР*. 1987. Т.192. С. 86.
10. Forrest S.R., Witter J. Long-rang correlations in smoke-particle aggregates // *J. Phys. A*. 1979. Vol. 12. P. L. 109.
11. Bardakhanov S.P., Korchagin A.I., Kuksanov N.K., Lavrukhin A.V., Salimov R.A., Fadeev S.N., Cherepkov V.V., Nanopowder production based on technology of solid raw substances evaporation by electron beam accelerator, *Materials Science and Engineering: B*. 2006, V. 132, № 1-2. 204-208.
12. Dobrescu G., Balabanova E., Zaharescu M., Ionescu N. I., ТЕМ Micrograph Fractal Analysis of Silica Powders // *Revue Roumanie de Chimie*. 2008. Vol. 53 (3). P. 217–221.
13. Бардаханов С. П., Викулина Л. С., Лысенко В. И., Номоев А. В., Полуянов С. А., Тузиков Ф. В., Анализ нанопорошков методом малоуглового рентгеновского рассеяния // *Вестник НГУ, Серия Физика* 2012, Т. 7, вып. 4., С. 107-116.
14. Мандельброт Б. *Фрактальная геометрия природы*. М.; Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
15. Диков Ю.П., Брытов И.А., Романенко Ю.Н., Долин С.П. Особенности электронного строения силикатов. М., Наука, 1979, с. 128.
16. Завьялов А.П., Брусенцева Т.А., Викулина Л.С., Бардаханов С.П., Чимытов Т.А., Сызранцев В.В., Модели взаимодействия наночастиц диоксида кремния с полимерными материалами // *Наноиндустрия*. 2013, вып.1, С.32-37.

## Сведения об авторах

Сызранцев Вячеслав Валерьевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Бурятский Государственный Университет (БГУ), адрес: 670000, Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а, тел. (913) 987-3306, e-mail: vvveliga@mail.ru.

Викулина Людмила Владимировна, Бурятский Государственный Университет (БГУ), адрес: 670000, Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а, ст. преподаватель кафедры теоретической и экспериментальной физики физико-технического факультета, служ.тел. (3012)210-588.

Бардаханов Сергей Прокопьевич, д.ф.-м.н., профессор, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича Сибирского Отделения Российской Академии Наук (ИТПМ СО РАН), Новосибирск, адрес: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, главный научный сотрудник дом. тел. (383)266-99-26, служ. тел. (383)330-42-78, Новосибирский Государственный Университет (НГУ), адрес: 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, главный научный сотрудник, e-mail: bard@itam.nsc.ru.

Номоев Андрей Валерьевич, Бурятский Государственный Университет (БГУ), адрес: 670000, Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а, д.ф.-м.н., доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики физико-технического факультета, дом. тел. (3012)214-659, служ.тел. (3012)210-588.