

УДК 547.1:621.7

*Н.Е. КОРОБОВА, А.Р. ШАБАНОВА, Н.В. ОСЬМАКОВА*

## **ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИ СТРУКТУРИРОВАННЫХ МОНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Представлена кластерная модель структуры порошкообразного сухого геля, полученного в «золь-гель» процессе электрофоретического осаждения металлоорганических соединений на электроде.

Интенсивное развитие физики открыло широкие возможности для применения новых материалов в различных областях промышленности и техники. Однако непрерывно возрастающие требования к надежности и точности электрофизических приборов вызывают необходимость создания качественно новых материалов с тонко регулируемыми свойствами [1-4].

Оксидные материалы всегда, а сегодня особенно, в своем многообразии оказываются весьма перспективными для решения различных задач новой техники (новых видов энергетики, ракетостроения и реактивной авиации, электро- и радиотехники, оптического приборостроения). Значительно повышаются требования к тугоплавкости, термической устойчивости материалов (до  $2000^{\circ}\text{C}$  и более), прочности и улучшению качества материалов по отношению к радиации, выдвигаются различные условия по электрическим, магнитным, оптическим свойствам [2].

В последние годы наблюдается интенсивное развитие технологии неорганических материалов с акцентом на ультрадисперсность [3]. Это связано в первую очередь с необходимостью решения сложных технических задач в области конструкционной керамики, технологии кварцевого стекла, волоконной оптики. В таких странах как США, Япония, ФРГ, Италия, Англия, Франция имеются национальные программы по конструкционной керамике.

Получение ультрадисперсных порошков для конструкционной и технической керамики обеспечивают следующие методы: (1) дезинтеграционный (измельчение до размеров частиц 0,1-1 мкм); (2) золь-гель метод; (3) метод осаждения; (4) использование газофазных реакций [4]. Последние 3 метода позволяют получать частицы размером от 0,10 мкм до 0,05 мкм, однако способ получения порошков оказывается не только

на размерах частиц и физико-химических свойствах, но и на таких его характеристиках, как спекаемость.

Наука о поведении дисперсных систем особенно в последнее время стала шире вторгаться в технологию производства различных материалов. Нет сомнений в том, что процессы структурообразования определяют не только возможности переработки дисперсий, но и свойства полученных из этих дисперсий продуктов. В основе процессов структурообразования лежит контактное взаимодействие между структурообразующими частицами. Поэтому изучение контактного взаимодействия превратилось в одно из центральных направлений науки о дисперсных системах. Прямое экспериментальное изучение взаимодействия между частицами в чистых модельных системах продвинуло теоретические представления, которые в настоящее время позволяют с хорошим приближением рассчитывать прочность отдельных коагуляционных контактов, прочность образованных этими частицами структур.

Эксплуатационные свойства порошковых материалов в значительной степени определяются созданной при формировании структурой. Моделирование структуры позволяет глубже понять процессы, протекающие при изготовлении порошковых материалов, что облегчает оптимизацию их формирования и термообработки. Теоретические расчеты при решении инженерных задач все же еще чрезвычайно затруднительны [5-8]. Это связано с тремя важными особенностями реальных дисперсных систем, с которыми имеют дело технологии в производственных условиях. Порошкообразные материалы, как правило, геометрически неоднородны (полидисперсны и образованы частицами неправильной, а иногда и сильно анизодиаметричной формы), многокомпонентны [7-8].

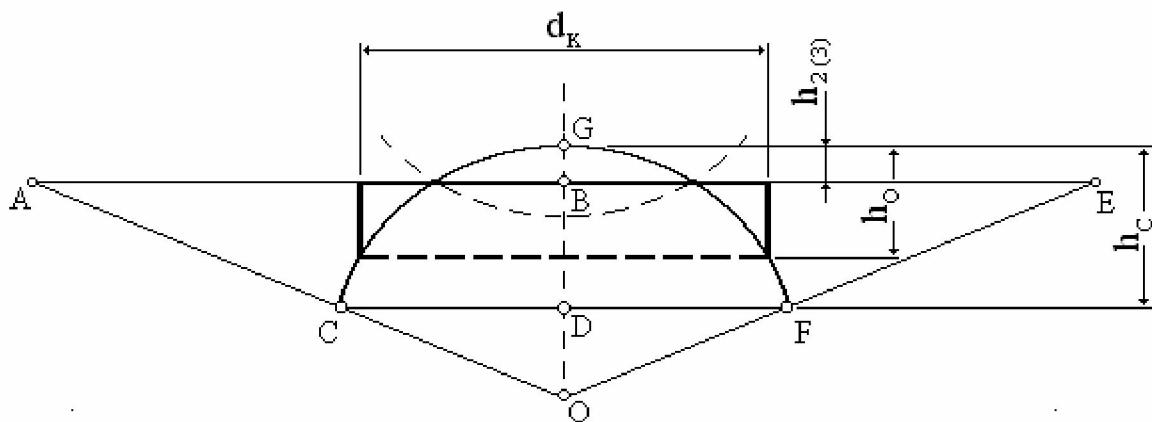


Рис. 1. Геометрическая схема для определения зависимости пористости от координационного числа и размера контакта

В данной работе авторы представляют структурную модель упаковки частиц, которая возможна при электрофоретическом осаждении на электроде.

#### Золь-гель переход

Рассмотрим некоторые особенности золь-гель технологии. Термин «золь-гель» выражает дисперсное состояние, используемое в коллоидной химии. Золь – состояние, при котором твердое вещество диспергирует в большом количестве жидкости; гель – состояние, при котором жидкость диспергирует в большом количестве твердого вещества. В соответствии с макроскопическими изменениями системы обычен процесс, протекающий в последовательности: жидкофазные реакции → золь → гель (микроскопический и сопровождающийся постепенным увеличением упорядоченности или степени полимеризации). Подвергая полученный гель термической обработке, синтезируют керамику [9]. При этом могут наблюдаться процессы, аналогичные процессам при спекании керамики: усадка порошка, его частичное плавление, разложение металлоорганической составляющей, осадка – термолиз, образование оксида [10]. Ниже представлена кластерная модель структуры порошкообразного сухого геля на электродре, полученного в результате электрофоретического осаждения золя металлоорганического соединения (МОС).

#### Реология порошковых структур

Для оценки структуры формованных порошковых материалов часто в первом приближении достаточно знать размер составляющих их час-

тиц, пористость, удельную поверхность полуфабриката, среднее координационное число и радиус контактов частиц [11]. Однако, в анализе необходимо учесть некоторые важные для технологии эффекты, например, увеличение среднего размера пор в начале спекания при одновременной усадке изделий при обжиге [11]. Допустим, что расположение частиц в таком осадке близко к расположению частиц при свободной засыпке. Удельный периметр (удельная поверхность)  $S$  порошковых смесей, полученных свободной засыпкой, близок к соответствующим значениям составляющих частиц:

$$S_o = 2M(1-\Pi)/D, \quad (1)$$

где  $M$  – размерность пространства,  $\Pi$  – пористость,  $D$  – размер пор.

Для упакованных частиц с различной степенью хаотичности упаковки следует учитывать площадь контактов между ними и среднее координационное число  $Z$  в системе (среднее число контактов, приходящееся на одну частицу). Выразим его через пористость системы. Длина (площадь) образуемых контактов однозначно определяется расстоянием между центрами частиц или соответствующей нормальной деформацией  $h_{2(3)}$  частиц (рисунок 1). Для ее оценки примем, что деформация частиц при образовании линейных или круговых контактов приводит к формированию из участков круга или шара вблизи контакта прямоугольного или цилиндрического перешейка. Условие равенства площади (объема) вытесненного при этом сегмента и вновь образованных площадей (объемов) можно заменить равенством площади прямоугольника  $d_k(h_o-h_2)$

или соответствующего ему цилиндра диаметром  $d_k$  и площади сегмента круга  $D^2 [\arcsin(d_k/D) - d_k/D]/4$  или шара, где  $h_o$  – высота сегмента с основанием, равным основанию прямоугольника (цилиндра).

Из прямоугольного треугольника, который можно построить на катете  $d_k/2$  и гипотенузе  $D/2$ , имеем  $h_2 = [D - (D^2 - d_k^2)^{0.5}]/2$ . Отсюда  $h_2 = h_o - 0.25D^2 [\arcsin(d_k/D) + (d_k/D)(1 - 2h_o/D)]/d_k$ , (2)  $h_3 = h_o - 4h_2^2 (1.5D - h_o)/(3d_k^2)$ . (3)

Пористость рассматриваемой системы определяется выражением

$$\Pi = 1 - q_{2(3)}/p_{2(3)}, \quad (4)$$

где  $q_{2(3)}$  и  $p_{2(3)}$  – площади треугольника АЕО и сектора ОСДФ, или объемы конуса и шарового сектора. Из геометрических соображений  $q_2 = \pi D^2/(4Z)$ ,  $q_3 = \pi D^3/(6Z)$ ,  $p_2 = b(D/2 - h)$ ,  $p_3 = \pi b_3^2(D/2 - h_3)/3$ , где  $b_{2(3)}$  – основание треугольника АВО (радиус основания соответствующего конуса). Величину  $b_2$  можно рассчитать непосредственно через половину центрального угла, ограничивающего сектор, поскольку она определяется координационным числом  $Z$ :

$$b_2 = (D/2 - h_2) \operatorname{tg}(\pi/Z). \quad (5)$$

В трехмерной системе шаровой сектор ограничивается центральным телесным углом, пропорциональным боковой поверхности отсекаемого шарового сегмента  $S = \pi Dh_c$ . Так как эту поверхность можно выразить через координационное число  $S = \pi D^2/Z$ , то  $b_3$  выразим через величину

$h_c = D/Z$ , которая определяет параметры трехмерной системы.

Рассмотрим подобные треугольники АВС и СДО, учитя, что квадрат гипотенузы первого равен  $b_3^2 + (D/2 - h_3)^2$ . Из соотношения  $AO/CO = BO/DO$ , используя значения  $h_c = D/Z$ , находим

$$b_3^2 = 4(1 - 1/Z)(D/2 - h_3)^2 [Z(1 - 2/Z)^2]. \quad (6)$$

Подставляя значения  $b_{2(3)}$ , окончательно получаем

$$1 - \Pi_2 = \pi/[Z(1 - 2h_2/D)\operatorname{tg}(\pi/Z)], \quad (7)$$

$$1 - \Pi_3 = (1 - 2/Z)^2 / [8(1 - 1/Z)(0.5 - h_3/D)^3]. \quad (8)$$

Данные выражения позволяют через гидравлический радиус  $r_r$  рассчитать удельный параметр (удельную поверхность)  $S_{02/3}$  и эквивалентный радиус пор  $r_{02(3)}$  двух- и трехмерной систем:

$$S_{02} = 4(1 - \Pi) \{1 - (Z/\pi)[\arcsin(d_k/D) - 2(h_o - h_2)/D]\}/D, \quad (9)$$

$$S_{03} = 6(1 - \Pi) \{1 - Z[h_o/D - d_k/D(h_o - h_3)/D]\}/D, \quad (10)$$

$$r_{02(3)} = 2r_r = 2\Pi_{2(3)}/S_{02(3)}. \quad (11)$$

Используя полученные выражения, рассчитаем координационное число  $Z$  двух- и трехмерных систем при различной пористости и разных размерах межчастичных контактов. Увеличение размера контакта при большой пористости незначительно снижает координационное число (таблица 1). При пористости, достаточно близкой к минимальной, влияние  $d_k$  резко возрастает.

Влияние координационного числа дисперсной системы на ее удельную поверхность  $S_0$  и эквивалентный радиус капилляров  $r_\Theta$  проиллюстри-

Таблица 1. Изменение координационного числа двух- и трехмерных систем в зависимости от пористости и размеров межчастичных контактов

Пористость, %	Z при $d_k/D$ , равном				
	0	0,05	0,1	0,2	0,4
$M = 2$					
0,093	6,000	5,969	5,938	5,812	5,344
0,215	3,992	3,992	3,984	3,952	3,811
0,395	3,004	3,004	2,996	2,984	2,945
0,660	2,383	2,382	2,382	2,379	2,367
0,840	2,193	2,193	2,193	2,191	2,188
$M = 3$					
0,260	11,188	11,125	10,938	10,250	8,250
0,320	8,969	8,938	8,844	8,438	7,094
0,476	5,875	5,844	5,812	5,656	5,125
0,550	4,992	4,984	4,981	4,969	4,500
0,660	4,047	4,047	4,031	3,969	3,766
0,840	2,969	2,969	2,961	2,938	2,867

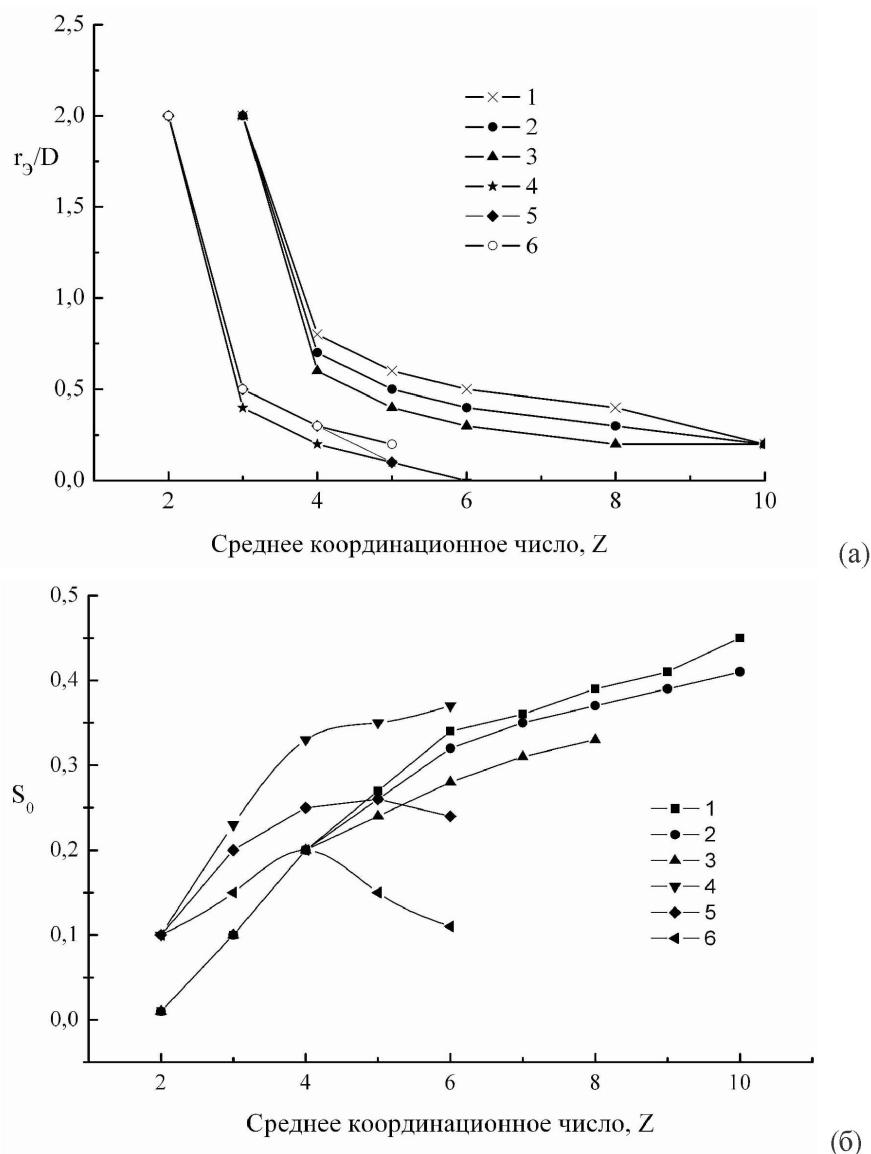


Рис. 2. Зависимости среднего эквивалентного радиуса капилляров  $r_0/D$  и удельной поверхности  $S_0$  от среднего координационного числа в трехмерной (1-3) и двухмерной (4-6) системах, где  $d_k/D = 0$  (1, 4), 0,2 (2, 5) и 0,4 (3, 6)

ровано на рисунке 2. В трехмерной системе соотношение  $d_k/D$  практически не влияет на зависимость  $r_0/D = f(Z)$ , так как оно полностью учитывается изменением  $Z$ . В двухмерной системе эта зависимость описывается семейством кривых с разными значениями  $d_k/D$ . Влияние размера контакта на зависимость  $S_0 = f(Z)$  двухмерной системы проявляется особенно резко. Оно может приобретать экстремальный характер: максимальная удельная поверхность достигается не при максимальном координационном числе. Следует отметить, что при выводе выражений для трехмерной системы объем, приходящий

ся на один контакт, считали равным объему конуса, тогда как при  $Z = 4(8)$  он имеет вид треугольной правильной (неправильной) пирамиды, а при  $Z = 6(12)$  – четырех- или пятиугольной правильной пирамиды. Это снижает точность выражений, что проявляется в несовпадении пористости трехмерной системы при  $Z = 12; 6$  и  $4$ , характеризующейся точечными контактами ( $d_k=0$ ), с пористостью соответствующих регулярных упаковок сфер одинакового диаметра.

Чтобы устранить этот недостаток, выражение (12) было уточнено с помощью метода наименьших квадратов:

$$1 - \Pi_3 = (Z-2)^2 / [8(Z^2 - 0,6Z - 1,76) (0,5 - h_3/D)^3]. \quad (12)$$

Результаты расчета по выражению (12) хорошо согласуются с известными данными [12], за исключением значения пористости при  $Z=8$ . Такое несоответствие, по-видимому, объясняется тем, что обычно считается невозможным изменять пористость без изменения координационного числа. В то же время необходимо помнить, что пористость объемно центрированной кубической упаковки – один (не наиболее вероятный) из вариантов упаковок – возможен с  $Z=8$ . Это подтверждается анализом Л. Фревеля и Л. Крессли [12], которые рассмотрели систему из слоев плотноупакованных моносфер с расстоянием между ними, изменяющимся от  $D$  ( $\Pi=0,3954$ ) до  $0,866 D$  ( $\Pi=0,2595$ ). Во всем диапазоне пористости, за исключением  $\Pi=0,2595$ , координационное число сфер в упаковке равно 8.

Рассмотрим особенности кластерной модели структуры порошковых материалов на базе двух- и трехмерных систем их хаотически уложенных кругов (сфер) одинакового диаметра  $D$ . Пористость  $\Pi_{2(3)}$  в этом случае статистически достаточно точно определяется средним числом контактов частиц с соседями (средним координационным числом  $Z_{2(3)}$ ). Примем, что кластеры в среднем являются трехслойными и круговыми (сферическими). В зависимости от пористости системы и в соответствии с фрактальным подходом они могут быть разного порядка, то есть кластеры могут выступать в роли частиц при формировании кластерной системы более высокого порядка.

Кластеры первого порядка образуются в дисперской системе при ее формировании в виде упаковки частиц с разной степенью хаотичности. Поскольку число контактов частиц подчиняется статистическому распределению, из геометрических соображений следует, что частицы с максимальным координационным числом образуют вокруг себя слой из частиц с ближайшими к максимальному координационными числами. К периферии кластера координационное число в среднем снижается, то есть статистическое распределение частиц по координационному числу предопределяет образование кластеров или их зародышей в дисперской системе. Выразим долю поверхности (объема) наружного слоя частиц кластера, определяющих кластерную и меж-

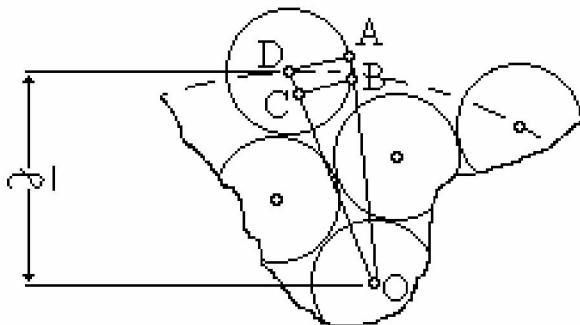


Рис. 3. Фрагмент двухмерного (трехмерного) сечения кластера

кластерную пористость, как сумму соответствующих круговых (шаровых) секторов для двух- и трехмерной систем.

Расстояние  $l_{2(3)}$  от центра кластера до центра частиц наружного слоя примем среднеарифметическим от расстояния между двумя рядами (слоями) в квадратной (простой кубической) 2D и расстояний между двумя рядами в треугольной ( $3^{0,5} D$ ) и гексагональной [ $2(2/3)^{0,5} D$ ] упаковках, то есть  $l_2=1,87D$  и  $l_3=1,82D$ . Тогда из прямоугольного треугольника  $O_0OA$  на рисунке 3 получаем  $OA=1,94D$  для двухмерной системы и  $OA=1,89D$  – для трехмерной. Далее из подобия треугольников  $O_0OA$  и  $OCB$  находим высоту сектора  $h_{2(3)} = D/2 - O_nC$  частицы наружного слоя, определяющего долю ее площади (объема), которая приходится на внутреннюю часть кластера ( $h_{2(3)}=0,43D$ ). Для двухмерной системы отношение площади сектора и круга равно  $\arccos(1-2h/D)/\pi = 0,45$ . В трехмерной системе на внутреннюю часть кластера приходится примерно 0,43 объема частиц наружного слоя.

Определим среднестатистическое число частиц в кластере  $N_{2(3)}$ , зная количество соседей в первой и второй координационных группах. В двухмерной системе для решеток с  $Z=3$  (4,6) в область, ограниченную этими группами, попадает 10 (13,19) частиц соответственно, откуда

$$N_2 = 3Z + 1. \quad (13)$$

В трехмерной системе для решеток с  $Z=4$  (6,12) в область, ограниченную двумя координационными группами, попадает 17 (19,31) частиц, откуда  $N_3 = 16 - Z/4 + Z^2/8$ . В отличие от двухмерной трехмерная система при максимальном координационном числе не переходит в упорядоченную систему без межкластерных полостей. Учтем заполнение межкластерных полостей

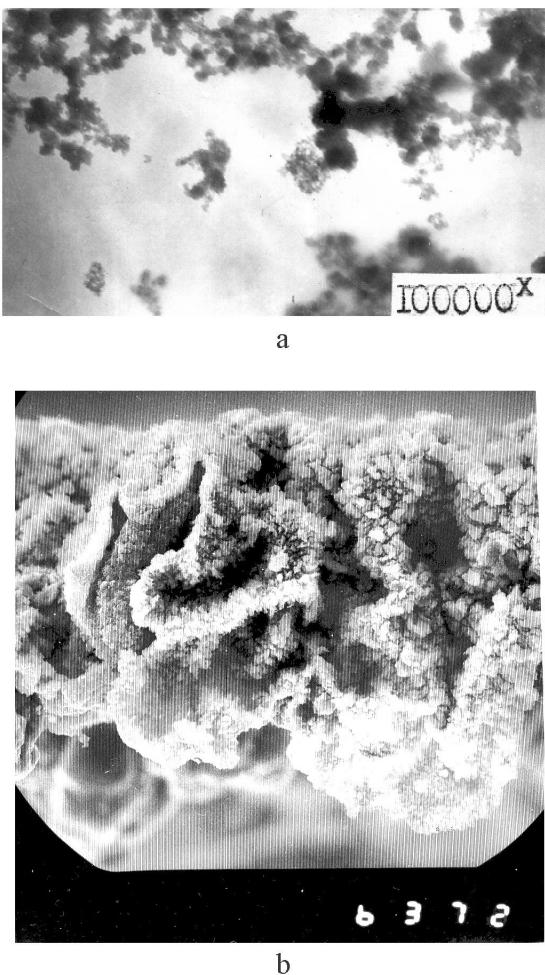


Рис. 4. Цепочки заряженных частиц, движущихся к электроду (а); гелеобразный осадок, сформированный на электроде при электрофорезе (б)

стицами. Диаметр кластера равен  $2l_3 + D = 4,46D$ , и так как на него приходится две тетраэдрические поры с  $d_t = 0,255 \cdot 4,64D$  (вмещаются две сферические частицы) и одна октаэдрическая с диаметром  $d_o = 0,414 \cdot 4,64D$  (вмещается 10 сферических частиц), в сумме получаем  $Z$  частиц на межкластерное пространство. Хотя эти частицы относятся к наружному слою частиц кластера, они могут быть удалены от центра кластера на расстояние от  $l_3$  до  $l_3 + D$ . Окончательно имеем

$$N_3 = 16 + 3Z/4 + Z^2/8. \quad (14)$$

Используя предложенную модель, проанализируем структуру электрофоретического геля [13] пористостью  $\Pi$  с точечными контактами между дисперсными частицами (рис 4).

Методика расчета параметров пористой структуры в кластерной модели заключается в

следующем. По средней пористости с помощью выражений (11)-(17) вычисляем среднестатистические параметры структуры  $Z$ ,  $S$  и  $r$ . Далее по значению  $Z$ , исходя из закона распределения частиц по координационному числу, например, нормальному, рассчитываем количество частиц в кластере и его наружном слое. Зная распределение частиц  $Z^k$ , приходящееся на внутреннюю часть кластера, и среднее координационное число частиц  $Z^{mk}$ , приходящееся на межкластерную пористость:

$$Z_{2(3)}^k = \int_{N_{2(3)}^H/N}^1 f_z(N/N_{2(3)}) dN + K_{2(3)} \int_0^{N_{2(3)}^H/N} f_z(N/N_{2(3)}) dN, \quad (15)$$

$$Z_{2(3)}^{mk} = (1 - K_{2(3)}) \int_0^{N_{2(3)}^H/N} f_z(N/N_{2(3)}) dN \quad (16)$$

Здесь  $N_{2(3)}^H$  – число частиц в наружном слое двух- или трехмерного кластера;  $f_z(N/N_{2(3)})$  – функция распределения числа частиц  $N$  по координационному числу  $Z$ ;  $K_2=0,45$ ;  $K_3=0,43$ .

Зная  $Z_{mk}$  и  $Z_k$ , по уравнениям (7), (9)-(12) рассчитываем средние значения пористости  $\Pi^{k(mk)}$ , удельной поверхности  $S_o^{k(mk)}$  и эквивалентных радиусов капилляров  $r_3^{k(mk)}$  в кластерах (межкластерном пространстве).

Если распределение частиц по числу контактов  $Z$  считать нормальным и пренебречь размером контактов, то с учетом результатов расчетов, приведенных в [12], удобно принять за основу такое распределение, %:

$$V_{2(3)}(Z = Z) = 48V_{2(3)}[Z = Z + 0,5(M - 1)] = 23$$

$$V_{2(3)}[Z = Z + 0,5(M - 1)] = 3; Z < 5(M - 1); \quad (17)$$

$$V_{2(3)}(Z = Z) = 48V_{2(3)}[Z = Z + 0,5(M - 1)] = \\ = 23 + 3 \cdot [Z - 5(M - 1)], \\ 5(M - 1) < Z < 5,5(M - 1); \quad (18)$$

$$V_{2(3)}(Z = Z) = 48 + 26[Z - 5,5(M - 1)];$$

$$V_{2(3)}[Z = Z + 0,5(M - 1)] = \\ = 26[6(M - 1) - Z]; 5,5(M - 1) < Z < 6 \cdot (M - 1) \quad (19)$$

С учетом нормального распределения (14)-(18) в ядре кластера находится одна частица, в среднем слое число частиц равно  $Z+M-1$ . На наружный слой кластера соответственно приходится

$$N_2^H = 2Z, N_3^H = 15 - Z/4 + Z^2/8. \quad (20)$$

На основе распределения (17)-(19) по значениям  $\Pi_{2(3)}$  с использованием выражений (7), (9)-

Таблица 2. Параметры пористой структуры двух- и трехмерных систем, рассчитанные с использованием кластерной модели

Средние параметры				Параметры кластерной структуры			
Z	Π	S	R	$\frac{Z^k}{Z^{mk}}$	$\frac{\Pi^k}{\Pi^{mk}}$	$\frac{S^k}{S^{mk}}$	$\frac{r^k}{r^{mk}}$
$M = 2$							
4	0,215	0,314	1,3694	$\frac{4,1205}{3,7642}$	$\frac{0,2017}{0,2437}$	$\frac{0,3193}{0,3025}$	$\frac{1,2634}{1,6114}$
5	0,135	0,346	0,7816	$\frac{5,1210}{4,7661}$	$\frac{0,1287}{0,1492}$	$\frac{0,3485}{0,3403}$	$\frac{0,7386}{0,8768}$
6	0,093	0,363	0,5133	$\frac{6}{6}$	$\frac{0,093}{0,093}$	$\frac{0,363}{0,363}$	$\frac{0,5133}{0,5133}$
$M = 3$							
6	0,4764	0,3142	3,0328	$\frac{6,2803}{5,5972}$	$\frac{0,4598}{0,5063}$	$\frac{0,3241}{0,2962}$	$\frac{2,8370}{3,4184}$
8	0,3733	0,3760	1,9855	$\frac{8,1419}{7,5857}$	$\frac{0,3675}{0,3910}$	$\frac{0,3795}{0,3654}$	$\frac{1,9371}{2,1401}$
10	0,3061	0,4163	1,4708	$\frac{10,2650}{9,5606}$	$\frac{0,2990}{0,3188}$	$\frac{0,4206}{0,4087}$	$\frac{1,4220}{1,5600}$
12	0,2595	0,4443	1,3362	$\frac{12}{12}$	$\frac{0,2595}{0,2595}$	$\frac{0,4443}{0,4443}$	$\frac{1,1689}{1,1689}$

(12), (20) были рассчитаны параметры  $Z_{2(3)}$  ( $Z^k_{2(3)}$  и  $Z^{mk}_{2(3)}$ ),  $\Pi_{2(3)}$  ( $\Pi^k_{2(3)}$  и  $\Pi^{mk}_{2(3)}$ ),  $S_{02(3)}$  ( $S^k_{02(3)}$  и  $S^{mk}_{02(3)}$ ),  $r_{\varTheta 2(3)}$  ( $r^k_{\varTheta 2(3)}$  и  $r^{mk}_{\varTheta 2(3)}$ ).

При значительной пористости сухого геля эквивалентные радиусы капилляров в кластерах и между кластерами существенно отличаются (таблица 2).

При спекании частиц в условиях последующей после сушки термообработки капиллярные силы в кластерах будут превышать аналогичные силы в межкластерном пространстве. Усадка кластерных образований будет проходить частично за счет увеличения размеров капилляров в межкластерном пространстве под действием растягивающих напряжений, то есть наряду с усадкой материала в начале спекания может увеличиваться средний размер пор.

Следует отметить, что рассмотренная кластерная модель применима и при других законах распределения частиц по координационному числу (например, к логарифмически нормальному) без изменения схемы вычислений. Чтобы уточнить модель, следует предварительно определить среднее число частиц в исходных агрегатах.

Таким образом, предложенная модель структуры формованных порошковых материалов позволяет учесть средний контакт и координационное число монодисперсных частиц. На ее основе можно проводить анализ основных структурных, например кластерных, эффектов, проявляющихся в технологических процессах производства керамических порошковых материалов.

В заключение следует отметить следующее. Процессы выделения новой фазы при формировании контактов и структур в дисперсных системах играют очень большую роль, а иногда и определяющую [13-14]. Это обстоятельство должно приниматься во внимание при разработке и управлении технологическими процессами. Поэтому мы нашли важным исследовать прямое измерение прочности контактов между структурообразующими частицами при их формировании и разрушении в условиях, соответствующих реальным процессам. Создание новых композиционных материалов с дисперсным упрочнением с повышенными физико-механическими свойствами должно привести к качественному скачку в технологии получения армирующих средств, теории неоднородных сред – оптимального ар-

мирования с широким спектром строения, свойств и областей применения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Background to technology: Book 11 Materials for Industry, 1996. Nelson Thornes publ.

2. *J. Lu, K. Ueda, A.A. Kaminskii et al.* Advanced Solid-State Lasers Conference, 2002 Technical Digest, Proceedings, Vol.Tops 68, pp. 318-320.

3. Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology. Eds. M.C. Roco, W.S. Bainbridge. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2004, 384р.

4. Физико-химические свойства ультрадисперсных материалов. Аттестация ультра-дисперсных материалов // Сост. Г.А. Чиганова. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. 24 с.

5. Сидняев Н.И. Численное моделирование получения проницаемых порошковых материалов, формирующихся при спекании // Механика композиционных материалов и конструкций, 2004 г., том 10, №1, с.93-97.

6. Сараев Л.А. Моделирование макроскопических пластических свойств многокомпонентных композиционных материалов. Самара: Самар. гос. ун-т, 2000. 183 с.

7. Григорьев А.К., Рудской А.И. Деформация и уплотнение порошковых материалов. М.: Металлургия, 1992. 192 с.

8. Власов А.В. Моделирование процессов прессования порошков в капсулах с учетом проскальзывания на границах сред // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 1998. № 3, с. 87-92.

9. Korobova N. "Amorphous and composite alumina thin films by sol-gel technology", X Internat. Conf. on "Physics of Non-Crystalline Solids", Italy, Parma 13-17 July, p.0-30

10. Korobova N. "Thin Oxide Amorphous Functional Films from Metal Alkoxides", Proceeding of IX Intern. Conf. on the Structure of Non-crystalline Materials, July 11-15 2004, NY USA.

11. Скороход В.В., Солонин Ю.М., Уварова И.В. Химические, диффузионные и реологические процессы в технологии порошковых материалов. – Киев: Наукова думка, 1990 – 248 с.

12. Фревель Л., Кressли Л. Реология порошковых материалов // Порошковая металлургия, 1993, №9-10, с. 69-71.

13. Сарсембинош Ш.Ш., Коробова Н.Е. Взаимодействие наночастиц в гелях алкооксидов металлов // Известия НАН РК, 2007, №2, с.22-29.

14. Sorbier, E. Rosenberg, C. Merlet // Microanal. Porous Mater. Microsc. Microanal, 2004, №10, pp. 745–752.

### Резюме

Электродтағы металлорганикалық қосындыларды «золь-гель» процесінде электрофорез әдісімен алынған ұнтақ тәрізді күрғақ гель құрылымының кластерлік моделі ұсынылған.

### Summary

Cluster structure model of dry powder gel, prepared during “sol-gel” process in the electrophoretic deposition method of organo-metal compounds on the electrode has been represented.

НИИЭТФ, Казахский государственный университет им. Аль-Фараби;

Национальная Инженерная Академия (НИА РК);  
Академия гражданской авиации (АК)

Поступила 02.03.09г.