



УДК 621.7: 621. 217

## ОЦЕНКА РАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

В.А. Лиопо, С.В. Авдейчик, Е.И. Эйсымонт, В.А. Струк, А.С. Воронцов

Гродненский государственный университет, Гродно, Белоруссия

**Аннотация.** Для описания степени дисперсности частиц вещества предлагается ввести классы диспергирования. Величина, характеризующая меру дисперсности, определяется выражением  $\delta = -\ln d$ , где  $d$  — линейный размер частицы. Для частиц произвольной формы следует указывать номера классов дисперсности для трех перпендикулярных направлений. Предложена обобщенная формула зависимости численного параметра характеристики физического свойства от размера частиц в нанодиапазоне. Обоснована необходимость введения понятия наноразмерности частиц.

**Ключевые слова:** дисперсность, размер частиц, наночастицы.

**1. Введение.** Наноконпозиционные материалы на основе полимерных матриц находят все большее применение в современном машиностроении. Служебные характеристики наноконпозитов зависят не только от содержания низкоразмерного модификатора, но и от особенностей его зарядового состояния, определяющего активность в процессах адсорбционного взаимодействия.

К числу наиболее распространенных низкоразмерных модификаторов полимерных матриц относят порошки металлов и оксидов, керамики, слоистых минералов, углеродсодержащие продукты детонационного и плазмохимического синтеза синтеза УДА, УДАГ, нанотрубки, фуллерены [1]. Установлены общие закономерности модифицирующего действия наночастиц различного состава и технологии получения, основанные на изменении кинетики адсорбционного взаимодействия полимерных макромолекул с активными центрами поверхностного слоя и формировании упорядоченной структуры граничного слоя иод действием электрических полей наполнителя.

Анализ исследований в области создания функциональных полимерных наноконпозитов свидетельствует об отсутствии единой точки зрения на влияние размеров и формы наночастиц на эффективность их модифицирующего действия. Для более строгого обоснования наноразмерности частиц модификатора потребовалось проведение теоретических исследований, объясняющих влияние размерных факторов на свойства вещества и позволяющих установить размер частиц  $L_0$ , ниже которого вещество начинает приобретать свойства отличные от тех, которые характеризуют вещество в большом объеме. При размерах частиц  $l < L_0$  вещество переходит в наносостояние, так как  $L_0$  соответствует размерам, меньшим 100 нм.

Прежде чем переходить к анализу указанных вопросов теории, мы считаем необходимым рассмотреть классификацию частиц вещества по их крупности, не затрагивая механизмы межатомных и межчастичных взаимодействий.

Все вещества, которые человек использует в различных видах деятельности, делятся на естественные, то есть истинно природные; искусственные, то есть созданные человеком по природным аналогам; и синтетические, то есть не встречающиеся в природе, а созданные человеком для решения отдельных технических, бытовых, лечебных, исследовательских и других задач. Вещества являются атомно-молекулярными системами и откликаются на внешнее



воздействие соответствующим образом, но всегда так, чтобы это воздействие ослабить. Если, например, в веществе создать температурные градиенты, то есть вдоль какого-то направления  $r$  будет наблюдаться изменение температуры  $\Delta T$ , то есть  $\Delta T/\Delta r \neq 0$ , то объект будет выравнивать эту температуру, что приведет к возникновению теплового потока. Если материальный объект деформируется, то возникающие в нем напряжения создадут условия для формирования в нем таких сил, которые будут препятствовать силам деформирования. Этих примеров можно привести достаточно много. Таким образом, в общем случае можно говорить об откликах объектов любой природы на соответствующее внешнее воздействие. Эти отклики изучают, их численные характеристики заносят в таблицы и называют свойствами материалов. Следовательно, принцип Ле-Шателье-Брауна: «Любая система отвечает на внешнее воздействие так, чтобы это воздействие максимально ослабить» проявляется в любых процессах и состояниях.

Когда в общем случае говорят о свойствах вещества, то, как правило, размеры образца этого вещества не учитывают. Например, рассмотрим параметры физических характеристик (электропроводность, теплопроводность, упругость и т.д.) металлов. В справочных источниках приведены значения параметров характеристик этого свойства без указания геометрических размеров образца, то есть предполагают, что размеры образцов на параметры этих свойств не влияют. Опыты показывают, что такое предположение действительно выполняется для широкого интервала размеров, но для очень маленьких (менее 0,1 мкм) частичек и у тонких пленок характеристики свойств могут существенно отличаться от объемных. Простейший пример – непрозрачный в макрообразце металл в пленочном состоянии пропускает свет.

Цель настоящей работы состояла в анализе влияния размерного фактора на параметры характеристик физических свойств материалов и установлении границы проявления наносвойств у их дисперсных частиц.

**2. Размерные классы частиц.** В технике, в быту человек обычно имеет дело с крупными телами. Считается, что мелкие объекты в практике играют менее заметную роль. Развитие нанотехнологий, то есть технологий с использованием наноразмерных объектов ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ), заставило обратить внимание на изучение их свойств. Появился новый раздел – нанопизика. В то же время мельчайшие системы играют громадную роль в жизнедеятельности организмов. Например, у человека при дыхании происходит поглощение кислорода в альвеолах легких, представляющих собой мельчайшие пузырьки воздуха, окруженные тончайшей пленкой, которую пронизывают капилляры. Общая площадь поверхности альвеол приближается к  $100 \text{ м}^2$ , а их число измеряется сотнями миллионов. Кислород, попадая в кровь, связывается эритроцитами, число которых в теле человека превышает 25 триллионов. Диаметр эритроцита человека составляет 7-8 мкм. Для сравнения, у слона этот размер 9 мкм, у кабарги – 2 мкм, у лягушки до 30 мкм. Громадную роль в нашей жизни играют биологические мельчайшие объекты – микроорганизмы (микробы и вирусы). Из своей жизненной практики мы знаем, что защититься от действия малых частиц, которое может быть не просто негативным, а разрушительным, гораздо труднее, чем от влияния крупных.

Существенное влияние на жизнедеятельность нашего организма оказывает пленочное состояние вещества. Например, долгое время считали, что вода в нашем организме выполняет функцию среды, в которой протекают биохимические реакции. Однако во второй половине XX века было установлено, что сама вода является активным участником процессов в живых организмах: она, к тому же, в этом случае обладает характеристиками свойств, отличными от характеристик объемной воды. Объемная вода при  $0^\circ\text{C}$  замерзает, и при этом увеличивается



ее объем. Следовательно, любое дерево после зимних морозов должно погибнуть, так как в его стволе есть вода, которая, замерзая (в стволах деревьев нет источников тепла), должна разорвать капилляры и клетки дерева. Этого не происходит потому, что капиллярная и тонкопленочная вода обладают свойствами, отличными от свойств объемной воды. Такая вода, при понижении температуры увеличивает вязкость и не замерзает даже при  $-40^{\circ}\text{C}$ . Она, как говорят, «застекловывается», что не приводит к увеличению объема. В капиллярах и тонких пленках молекулы воды лишаются той подвижности, которая свойственна молекулам в объемной воде. Неудивительно, что пленочная вода характеризуется такой характеристикой, как сдвиговая упругость. Пленочная вода намного слабее реагирует на действие электрического поля, и ее теплопроводность может превосходить эту характеристику для объемной воды в 70 раз [1-3]. Каждая клетка нашего организма омывается жидкой субстанцией на основе пленочной воды. Если клетку моделировать шаром, то при радиусе  $d = 4000 \text{ \AA} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  ее поверхность равна  $S \approx 5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ . Количество клеток в нашем организме  $N = 10^{18}$ . Следовательно, общая площадь поверхности всех клеток  $P = 5 \cdot 10^5 \text{ м}^2 = 0,5 \text{ км}^2$ . В 70-ти килограммовом человеке воды примерно 50 л, значит толщина пленки на поверхности каждой клетки равна в среднем  $10^{-7} \text{ м}$ , то есть она включает не более 500 мономолекулярных водных слоев [3].

Биофизики, биохимики, физиологи и врачи в последние годы рассматривают гипотезу о том, что вода в живых организмах является не просто средой, необходимой для осуществления различных биохимических реакций и процессов, но сама, находясь в особом состоянии, является таким же фундаментальным элементом жизненных процессов, как дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК), белки, липиды и др. Эти примеры, а к ним можно добавить и другие, показывают, что мир мелкодисперсных частиц и тонких пленок играет громадную роль в процессах существования различных форм жизни на Земле.

Естественно, частицы влияют на природные процессы, а то, что при наноуровневых размерах вещества начинают менять параметры своих свойств по сравнению с объемными, находит все большее применение на практике. Это обстоятельство привело к появлению новых технических решений, получивших название нанотехнологий, а также к формированию биофизики, как раздела физики поверхностного состояния, занимающегося изучением наноразмерных объектов.

Как крупные, так и мелкие частицы могут иметь различную форму, когда их линейный размер вдоль различных направлений может иметь значения, резко отличающиеся от размеров для других направлений. Если исключить эти варианты, то можно говорить о частицах, у которых величина поперечного размера ( $d$ ) не зависит от направления.

При описании частиц с малыми размерами указывают либо их поперечный размер ( $d$ ), либо число таких частиц в 1 метре. Величину  $D$ , равную

$$D = 1/d, \quad (1)$$

называют дисперсностью частицы.

Так как размеры частиц обычно на порядки меньше метра, то удобнее использовать величину, называемую мерой дисперсности  $\delta$ , равную

$$\delta = \lg D = -\lg d. \quad (2)$$

В зависимости от меры дисперсности всю совокупность частиц можно разделить на несколько типов или классов дисперсности (таблица 1).



Таблица 1

Классификация частиц в зависимости от их размеров

Номер класса частиц	Размер частиц $r$ [м]	Дисперсность $D$	Мера дисперсности $\delta$	Название класса дисперсности
0	$r > 1$	$D < 1$	$\delta < 0$	Гигантские
1	$1 > r > 0,1$	$1 < D < 10$	$0 < \delta < 1$	Очень крупные
2	$10^{-1} > r > 10^{-2}$	$10 < D < 10^2$	$1 < \delta < 2$	Сантиметровые
3	$10^{-2} > r > 10^{-3}$	$10^2 < D < 10^3$	$2 < \delta < 3$	Миллиметровые
4	$10^{-3} > r > 10^{-4}$	$10^3 < D < 10^4$	$3 < \delta < 4$	Слабодиспергированные
5	$10^{-4} > r > 10^{-5}$	$10^4 < D < 10^5$	$4 < \delta < 5$	Среднедиспергированные
6	$10^{-5} > r > 10^{-6}$	$10^5 < D < 10^6$	$5 < \delta < 6$	Микронные
7	$10^{-6} > r > 10^{-7}$	$10^6 < D < 10^7$	$6 < \delta < 7$	Высокодиспергированные
8	$10^{-7} > r > 10^{-8}$	$10^7 < D < 10^8$	$7 < \delta < 8$	Очень мелкие
9	$10^{-8} > r > 10^{-9}$	$10^8 < D < 10^9$	$8 < \delta < 9$	Наноразмерные
10	$10^{-9} > r > 10^{-10}$	$10^9 < D < 10^{10}$	$9 < \delta < 10$	Предельно мелкие

При размерах объекта  $r > 1$  м говорить об этом объекте как о частице просто нет смысла, это действительно громадный объект, поэтому в таблице номер класса у такого типа частиц нулевой. Так как размеры атомов лежат вблизи  $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$  м, то размер частицы меньше  $10^{-10}$  м невозможен. Таким образом, все частицы по своим размерам оказываются распределенными по 10 классам, каждый из которых находит определенное применение в различных областях деятельности, например, частицы классов 1, 2 применяют в строительстве, 3, 4 – как наполнители в бетонных системах, в дорожном строительстве, 5-7 – в медицинских препаратах, в различных пищевых добавках, в отраслях химической промышленности. Наибольший интерес в последние годы вызывают частицы 8-10 классов, которые относят к наноразмерным системам.

Очевидно, что реальные вещественные объекты, имеющие различную форму, но разным направлениям могут относиться к различным классам дисперсности. Например, проволока вдоль своей оси относится к классу 0, а по направлению в сечении плоскостью перпендикулярной оси, может относиться к классам 4÷6. Это же замечание относится к листовым и пленочным материалам.

В общем случае для частиц любой формы для указания их дисперсности можно использовать обозначения тремя числами  $m, n, p$ , где эти числа обозначают класс дисперсности вдоль трех перпендикулярных осей. Значения этих классов можно указывать в порядке возрастания номера класса дисперсности.

**3. Факторы, влияющие на свойства вещества.** Известно, что на количественные параметры свойств веществ оказывает влияние достаточно большое число самых различных факторов, которые можно разделить по нескольким группам.

Влияние химического состава вещества не требует какого-то особого аргументирования. Очевидно, что, взяв вещества разного химического состава, мы получим материалы с совершенно разными параметрами свойств, даже если эти вещества в чем-то похожи друг на друга. Например, элементы одной группы (C и Si или Al и Sc и т.п.) имеют много общего в химических реакциях, но отличаются друг от друга по значениям параметров физических свойств.



Некоторые из этих параметров могут быть достаточно близкими для веществ разного состава, например, электро- или теплопроводность многих металлов и сплавов, но всегда имеются параметры, которые разнятся в зависимости от состава [4].

Вещества могут иметь одинаковые структурные мотивы. В качестве примера рассмотрим структуру сфалерита ( $ZnS$ ), приведенную на рис. 1. Если в решетке сфалерита атомы  $Zn$  и  $S$  заменить атомами углерода, то получим структуру алмаза. Если вместо атомов в сфалерите размещены молекулы воды, то это будет структура льда-1. Сфалеритовый тип структуры имеют многие полупроводниковые (с алмазоподобной структурой) кристаллы [5].

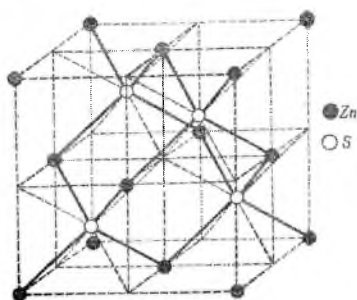


Рис. 1. Структура кристалла сфалерита ( $ZnS$ ).

Вторая группа включает один, но очень важный фактор – идеальная структурная модель («идеальный структурный мотив», по Н.В. Белову [5]). Речь идет о структуре вещества, описываемой идеализированной взаимоконфигурацией (взаимным расположением) образующих его атомов. Эта идеализированная схема строго соответствует определенной точечной и пространственной группам, если вещество кристалл, либо определенному типу взаиморасположения координационных полиэдров, молекул, радикалов, отдельных атомов. Если вещество некристаллическое, то и в этом случае вещества с одинаковым составом могут иметь разные параметры свойств, так как одни и те же атомы могут образовывать различные молекулы [5,6].

Наиболее яркими примерами кристаллов с одинаковым химическим составом и различными свойствами являются алмаз и графит, серое и белое олово, полиморфные модификации железа, аллотропные разновидности серы и др.

Факторы первого и второго типа можно объединить, введя понятие «идеальная кристаллохимическая модель» для кристаллов и «структурно-химическая модель» для некристаллических веществ [6].

Третья группа факторов, влияющих на свойства веществ – это дефекты, которые являются любыми отклонениями состава или структуры данного конкретного образца («вещественного индивидуума» по терминологии Н.В. Белова) от идеальной кристаллохимической модели. Понятие дефекта (дефектности) в физике не имеет негативного смысла. Наоборот, дефектность – это возможность изменить свойства вещества в требуемом направлении. Например, введение примесей в диэлектрик может преобразовать его в полупроводник. Дефекты могут изменить прочностные характеристики, например, ковка упрочняет стальное изделие [7].

Дефекты можно разделить на несколько типов по их размерности. Нульмерные или точечные дефекты затрагивают отдельные атомы. К таким дефектам относят смещения атомов от идеального положения в произвольную (межузельную) позицию (дефекты по Френкелю), певхождение атома в его структурную позицию, то есть образование вакансий (дефекты по



Шоттки), дефекты замещения основного атома примесным, внедрение «чужого» атома в междоузлия (дефект внедрения) и т.п.

Следует отметить, что нульмерный (точечный) дефект вызывает искажения соответствующей ячейки кристалла, что вызывает изменения в соседних ячейках. Следовательно, точечный дефект может вызвать изменения в объеме кристалла, существенно превышающем объем одной ячейки. Например, при наличии дефекта замещения положительный одновалентный катион кристалла может быть заменен двух- и даже трехвалентным катионом без появления вакансии, а электростатическая нейтральность достигается за счет вхождения в кристалл электронов. Появляется положительно заряженный центр и связанный с ним электрон (или электроны). Электрон характеризуется своими состояниями с уровнями энергии в оптическом диапазоне. В спектре поглощения такого кристалла появляются дополнительные линии. Такие, связанные с дефектами, электроны называются центрами окраски, так как их присутствие в прозрачных кристаллах вызывает их окрашивание. Этот эффект особенно отчетливо проявляется в прозрачных щелочно-галогидных кристаллах.

Кроме нульмерных дефектов в кристаллах возможно существование одномерных дефектов, которые называются дислокациями. Дислокации бывают двух типов: краевые и винтовые (рис. 2).

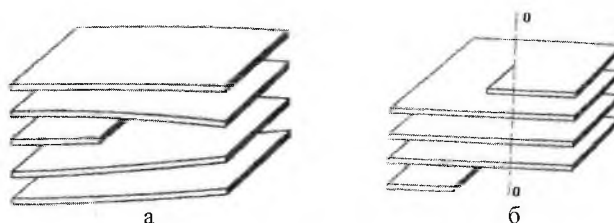


Рис. 2. Схемы краевой (а) и винтовой (б) дислокаций.

Так как дислокации, во-первых, могут появиться вследствие действия на кристалл внешних сил, а во-вторых, создают области механических напряжений в кристалле, то есть они изменяют параметры его свойств, в том числе, и поверхностных. Следовательно, действуя на кристалл внешней силой (например, при ковке), можно изменить (увеличить) число дислокацией, то есть повысить, например, твердость или износостойкость детали. При дроблении, т.е. диспергировании, кристалла в кристаллитах может повыситься концентрация дефектов, что приведет к повышению активности их поверхности. Это крайне важно для многих технологических процессов, например, при флотационном обогащении полезных ископаемых, для повышения модифицирующего действия частиц наполнителя на вещество матрицы композиционного материала и др. [1].

Двухмерными дефектами в кристаллах является поверхности, которые зачастую играют решающую роль в ходе различных природных и технологических процессов. Поверхностью частицы любого объема является геометрическое место точек по одну сторону от которых геометрический луч, исходящий из этой точки, направлен внутрь вещества, а по другую – в среду иной природы, то есть другого состава и структуры. Естественно, поверхность, как двухмерный дефект, влияет на атомные слои вещества в приповерхностных слоях, и это влияние проявляется особенно сильно в объектах с малыми размерами.

При наличии в частице включений других фаз (частицы других веществ, газоводных линз, каверн, пор, трещин и т.п.) говорят о трехмерных дефектах. В реальных кристаллах все ви-

ды дефектов зачастую существуют одновременно, так как, например, наличие трехмерных дефектов связано с существованием поверхностей раздела, которые, в свою очередь, вызовут искажение идеальной структуры, по крайней мере, в приповерхностных атомных слоях [7].

Обычно, говоря о дефектах, рассматривают стационарные состояния частицы вещества. В реальных ситуациях и концентрация дефектов и их типы могут изменяться с течением времени. В этом случае следует говорить о динамическом дефекте, подчеркивая его изменчивость во времени. В качестве примера можно привести эффект закалки, когда в образце создаются дефекты вследствие резкого охлаждения нагретого вещества. Это приводит к внутренним напряжениям. Так как внутренняя энергия дефектного кристалла обычно больше внутренней энергии кристалла без дефектов, то в кристалле происходят релаксационные процессы. Отпуск после закалки – пример проявления динамического дефекта [7].

Четвертой группой факторов, влияющих на свойства вещества, являются характеристики внешней среды. В одной среде вещество может обладать одними свойствами, а в другой – совершенно другими. Вариации температуры, характера механических напряжений, влажности, рН среды и т.д. приводят к изменению как параметров свойств, так и самих веществ. Часто эти изменения могут быть весьма существенными. Например, какая-то деталь, изготовленная из одного материала, может эффективно эксплуатироваться в одной среде и разрушаться при действии на нее другой.

**3. Зависимость физических характеристик наночастиц от размера.** Зависимость параметров физического свойства от размерного фактора начинает проявляться для частиц 9-го и 10-го классов дисперсности (таблица 1). Для примера приведены экспериментальные результаты исследований, взятые из работ [8-10], которые характеризуют типичную зависимость параметра конкретного свойства от размера частиц (рис. 3).

Существует размерная область, где физическое свойство ( $S$ ) определяется постоянными параметрами, которые и вносят в таблицы (рис. 4). При размерах, меньших свойственного каждому веществу значения  $l = L_0$ , численный параметр свойства изменяется и, как следует из приведенных графиков, приближается к нулю в предельном переходе  $r > 0$ . Таким образом, размер  $l = L_0$ , является размерной границей между макросостоянием вещества, когда размер объекта не оказывает влияния на его свойства, и наносостоянием, когда в области  $l < L_0$  начинают играть роль размерные факторы. Сама эта граница, как показывают многочисленные исследования, лежит в нанодиапазоне.

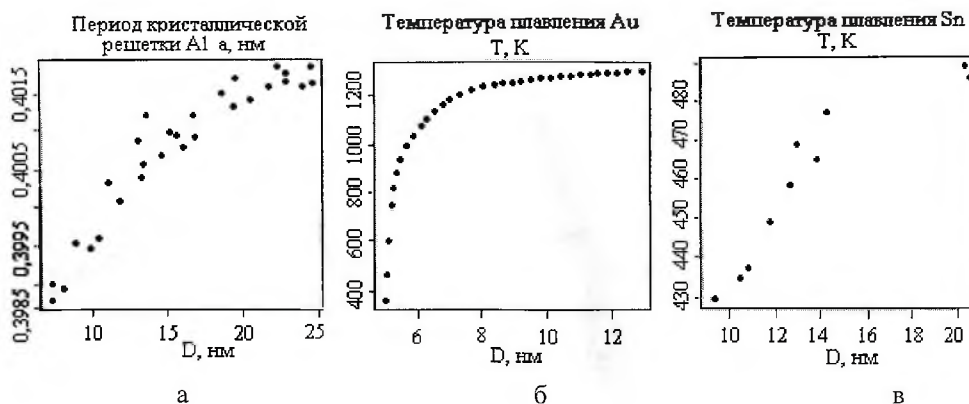


Рис. 3. Зависимости периода решетки алюминия от диаметра наночастиц (а) [8], температур плавления золота (б) [10], и олова (в) [9] от размера их наночастиц.

Трудности анализа наносвойств веществ обусловлены многими обстоятельствами. Прежде всего, это связано со сложностями получения объекта с одинаковыми размерами частиц. Как показывает эксперимент, наличие в объекте частиц с размером, превышающим  $L_0$ , искажает значения параметров, свойственных частицам с усредненным размером для данной дисперсной системы.

Типичная обобщенная зависимость физического свойства от размера частиц приведена на рис. 4 [8]. Значение  $S_V$  является постоянной величиной и соответствует свойствам объемной частицы. Параметр  $L_0$  является размерной границей между нано- и макросостояниями. Чем больше  $r$  отличается от  $L_0$ , тем достовернее принадлежность изучаемого объекта к объемному (макро) состоянию или к наносостоянию. Следовательно,  $L_0$  не является резкой границей между указанными состояниями. Этот параметр, в какой-то мере, напоминает температуру Дебая, которая характеризует граничную область между квантовой и классической областями при описании свойств кристаллов.

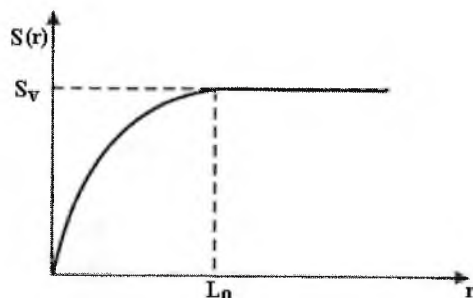


Рис. 4. Обобщенная кривая зависимости значений параметра физического свойства от размера частиц.  $S_V$  – объемное значение параметра;  $L_0$  – размерная граница между нано- и макросостояниями.

Приведенная кривая всегда может быть построена при соответствующем выборе параметра. Например, электропроводность и сопротивление не могут меняться одинаково. Но всегда можно добиться, чтобы оценка параметра была такая, что при уменьшении  $r$  уменьшалось бы и значение  $S(r)$ . Зависимость  $S = S(r)$ , приведенная на рис. 4, может быть представлена функцией вида:

$$S(r) = \frac{S_V}{\left| \exp \alpha \left[ \left( \frac{L_0}{r} \right)^n - 1 \right]^{3/2} \right|}, \quad (3)$$

где  $\alpha, n$  – постоянные положительные величины, зависящие от вещества и изучаемого свойства,  $S_V$  – значение объемного свойства. Если  $r \geq L_0$ , то  $S(r) = S_V$ . Действительно, если  $r > L_0$ , то  $L_0/r < 1$  и в квадратных скобках величина  $\left[ \left( \frac{L_0}{r} \right)^n - 1 \right] < 0$ , то есть показатель экспоненты становится мнимой величиной. При этом модуль  $|e^{iA}| = |(e^{iA} \cdot e^{-iA})^{1/2}|$  всегда равен единице. Производная  $dS(r)/dr$  имеет вид:

$$\frac{dS}{dr} = \frac{3n \cdot \alpha \cdot \left( \frac{L_0}{r} \right)^{n-1} \left[ \left( \frac{L_0}{r} \right)^n - 1 \right]^{1/2}}{2r^2 \exp \alpha \left[ \left( \frac{L_0}{r} \right)^n - 1 \right]^{3/2}}. \quad (4)$$





В области  $0 < r < L_0$   $dS/dr > 0$ , при  $r = L_0$   $dS/dr = 0$ . Так как при  $r > L_0$   $S(r) = S_V = \text{const}$ , то  $(dS/dr)_{r>L_0} = 0$ . Следовательно, функция  $S(r)$  (см. (3)) и ее производная непрерывны во всех областях существования  $r$  [8].

Анализ литературных данных, которые отражают экспериментальные зависимости  $S(r)$  для различных свойств, показывает, что  $\alpha$ , как и  $L_0$ , является параметром, свойственным определенному веществу, а значения  $n$  достаточно хорошо аппроксимируются величиной  $n = 2$ . В этом случае открывается возможность экспериментального определения численного значения параметра  $\alpha$ . Действительно, из эксперимента определяются величины  $S(r)$  и  $r$ . Значения  $S_V$ , характеризующие объемные свойства, либо берутся из таблиц-справочников, либо определяются экспериментально на образцах с макроразмерами. Величина  $L_0$  может быть либо получена из экспериментальных зависимостей  $S(r)$ , либо рассчитана по формуле:

$$L_0 = \sqrt{\frac{1,5}{km}} \cdot h(\theta_D)^{-1/2} = 230(\theta_D)^{-1/2}, \quad (5)$$

где  $h, m, k$  — физические постоянные: Планка, Больцмана, масса электрона соответственно;  $\theta_D$  — температура Дебая.

Параметр  $L_0$  в формуле (5) имеет размерность [нм] [11].

Как и в случае отнесения частиц к определенному классу дисперсности, когда по разным направлениям измерения линейного размера объект будет соответствовать разным классам дисперсности, при анализе мелких частиц вероятны три ситуации:

1. Чешуйчатая частица может иметь толщину  $l < L_0$ , а в плоскости чешуйки все  $r > L_0$ . Следовательно, такая чешуйка является одномерной наночастицей.

2. Если частица имеет такую форму, что вдоль одного направления  $l > L_0$ , а во всех направлениях перпендикулярных первому  $r < L_0$ , то такая частица называется наностержнем (нанопроволокой, вискером), и она относится к двумерным наночастицам.

2. Собственно наночастицы имеют наноразмерность, равную трем, то есть во всех направлениях их линейный размер  $r < L_0$ .

Форма наночастиц, то есть их габитус, в определенной мере зависит от способа их получения, но при диспергировании крупных кристаллов, то есть при переходе частицы в класс со все большим значением дисперсности, главное влияние на габитус оказывает точечная группа исходного кристалла. Для частиц классов 1-3 форма может быть произвольной, то есть механической обработкой можно придать объекту вид частицы с точечной симметрией, некоррелирующей с точечной симметрией макрокристалла. Последняя начинает проявляться при переходе к классам возрастающей дискретности и для классов от четвертого до седьмого габитус частиц — полиэдр с симметрией соответствующей точечной группы.

При переходе в нанобласть во все большей степени начинает проявляться влияние поверхности частицы, грани и ребра полиэдров сглаживаются и изгибаются. Частица приобретает форму трехосного эллипсоида с различными отношениями осей. Точечная симметрия габитуса наночастиц будет описываться предельной точечной группой кристалла в соответствии с его сингонией. Более подробно этот вопрос будет нами проанализирован в последующих публикациях.

**Закключение.** Любое вещество в природе формируется в виде частиц с различными размерами от десятков, сотен и более метров до нанометров. По степени дисперсности частицы предлагается разделить на классы, номера которых определяются величиной  $\delta = -\ln d$ , где  $d$  — линейный размер частицы в метрах. Если форма частицы отличается от сферической, то



следует указать классы вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений в порядке возрастания номера класса дисперсности.

Установлено, что приведенные в научной литературе зависимости численных параметров различных свойств вещества в нанодиапазоне размеров их частиц описываются кривыми одинаковой формы. Предложена формула, описывающая эту зависимость. Обосновано существование наночастиц с различной размерностью, то есть одномерные наночастицы (чешуйки, пленки, пластинки), двумерные наночастицы (стержни, проволоки, усы) и трехмерные наночастицы (имеющие сферическую или близкую к ней форму).

### Литература

1. Авдейчик С.В. и др. Полимер-силикатные машиностроительные материалы: физико-химия, технология, применение / под ред. В.А. Струка, В.Я. Щербы / Минск: Техноложя, 2007. – 432 с.
2. Лиопо В.А. и др. Действие кристаллов слюд на поверхностные водные пленки // Веснік ГрДУ. – 2008. – Сер.2; №3. – С.93-100.
3. Лиопо В.А. Эта непростая простая вода // Альфа, 2001. – №1. – С.51-59.
4. Брэгг У., Кларингбулл Г. Кристаллическая структура минералов / М.: Мир. 1967. – 390 с.
5. Белов Н.В. Очерки по структурной минералогии / М.: Недра, 1976. – 344 с.
6. Нараи-Сабо И. Неорганическая кристаллохимия / Будапешт: Изд. АН Венгрии, 1969. – 504 с.
7. Струк В.А., Гольдаде В.А., Комар В.Ф. и др. Материаловедение и конструкционные материалы / Часть 2. Металлы и сплавы /- Гродно: Изд. ГрГУ, 2007. – 240 с.
8. Лиопо В.А., Струк В.А., Авдейчик С.В. Введение в физику наноразмерных частиц // Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития. Гродно: ГГАУ, 2008. – С.223-272.
9. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
10. Ajayan P.M., Schadler L.S., Braun A.V. Nanocomposite science and technology / Willey. VCY. GmbH I Co KgaA, 2004. – 230 p.
11. Лиопо В.А. Размерная граница между нано- и объемными состояниями: теория и эксперимент // Веснік ГрДУ. – 2007. – Серия 2; №2. – С.65-71.

### ESTIMATION OF SIZE PARAMETERS OF MATERIAL OBJECTS

V.A. Liopo, S.V. Avdeychik, E.I. Asymont, V.A. Struk, A.S. Vorontsov

Grodno State University, Grodno, Belarus

**Abstract.** It is proposed to introduce some dispersibility classes for characterization of material particles. The magnitude characterizing the dispersibility is defined by  $\delta = -\ln d$  where  $d$  is the linear size of particle. For particles of arbitrary form, it is necessary to point out the number of its dispersibility class at three directions perpendicular to each other. It is proposed the general formula of physical characteristics dependency on particle size at nano-diapason. It is based the necessity of introducing of the concept particle nano-dimension.

**Key words:** dispersibility, size of particles, nanoparticles.