

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

КАФЕДРА ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Е. В. Саврук, В. В. Каранский

ФИЗИКО-ХИМИЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Учебно-методическое пособие
по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе
для студентов направлений подготовки
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»,
профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»,
28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»,
профиль «Нанотехнологии в электронике и микросистемной технике»**

2016

Рецензент: Смирнов С. В., д-р техн. наук, профессор кафедры Физической электроники ТУСУР.

Саврук Е. В., Каранский В. В.

Физико-химия наноструктурированных материалов: учебно-методическое пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе для студентов направлений подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника», и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника», профиль «Нанотехнологии в электронике и микросистемной технике». — Томск: ТУСУР, Кафедра Физической электроники, 2016. — 51 с.

© Саврук Е. В., Каранский В. В., 2016
© ТУСУР, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ДИСПЕРСНОСТЬ	6
2 ТЕРМОДИНАМИКА ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ	14
3 ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ	23
4 МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ	32
5 ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА НАНОСИСТЕМ	41
6 ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ	47
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	50

ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие содержит краткую теорию, примеры решения задач, задачи для самостоятельного решения, тестовые задания и список рекомендуемой литературы по каждой теме практических занятий, а также вопросы к зачету по дисциплине «Физико-химия наноструктурированных материалов» и предназначено для студентов очной формы, обучающихся по направлениям подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» (профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника») и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» (профиль «Нанотехнологии в электронике и микросистемной технике»).

В дисциплине «Физика-химия наноструктурированных материалов» предметом изучения являются свойства и закономерности поведения реальных объектов, представляющих собой дисперсные системы (наносистемы). Знание закономерностей, присущих дисперсным системам (наносистемам), необходимо не только для оптимизации технологических процессов, но и при получении материалов с заданными свойствами, а также при решении конкретных задач.

Тематика практических занятий: дисперсность, термодинамика дисперсных систем, оптические свойства дисперсных систем, молекулярно-кинетические свойства дисперсных систем, тепловые свойства наносистем.

Процесс изучения дисциплины «Физико-химия наноструктурированных материалов» направлен на формирование у студентов направления подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» следующих компетенций:

– способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики (ОПК-1);

– способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат (ОПК-2);

– способность учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности (ОПК-7).

Процесс изучения дисциплины «Физико-химия наноструктурированных материалов» направлен на формирование у студентов направления подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» компетенции:

– способность учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности (ОПК-7).

1 ДИСПЕРСНОСТЬ

1 Краткая теория

Дисперсность – физическая величина, характеризующая размер взвешенных частиц в дисперсных системах.

Дисперсная система – образование из двух или большего числа фаз (тел), которые практически не смешиваются и не реагируют друг с другом химически. Первое из веществ (*дисперсная фаза*) легко распределено во втором (*дисперсная среда*).

Мерой раздробленности дисперсной системы могут являться следующие параметры.

Поперечный размер частицы (a).

Дисперсность (D) – величина, обратная поперечному размеру частицы

$$D = \frac{1}{a}.$$

Удельная поверхность ($S_{y\partial}$) – межфазная поверхность, приходящаяся на единицу объема дисперсной фазы

$$S_{y\partial} = \frac{\sum_{i=1}^N S_{\partial\phi_i}}{\sum_{k=1}^N V_{\partial\phi_k}},$$

где $S_{\partial\phi_i}$ – площадь дисперсной фазы; $V_{\partial\phi_k}$ – объем дисперсной фазы.

С другой стороны, удельную поверхность можно рассчитать следующим образом

$$S_{y\partial} = \frac{\sum_{i=1}^N S_{\partial\phi_i}}{m_{\partial\phi}},$$

где $m_{\partial\phi}$ – масса дисперсной фазы.

Число сферических частиц (n) – отношение объема системы ($V_{\text{общ}}$) (дисперсной фазы) к объему одной сферической частицы ($V_{\text{шара}}$).

$$n = \frac{V_{\text{общ}}}{V_{\text{шара}}}$$

Поверхностная энергия (G_S) – энергия, определяемая суммарной поверхностью частиц S и величиной поверхностного натяжения σ .

$$G_S = S\sigma$$

2 Примеры решения задач

1 Дисперсность частиц коллоидного золота равна 10^8 м^{-1} . Принимая частицы золота в виде кубиков, определите, какую поверхность $S_{\text{общ}}$ они могут покрыть, если их плотно уложить в один слой. Масса коллоидных частиц золота 1 г. Плотность золота равна $19,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Дано: $D=10^8 \text{ м}^{-1}$; $m=1 \text{ г}$; $\rho=19,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Найти: $S_{\text{общ}}?$

Решение:

Общая площадь поверхности частиц коллоидного золота равна $S_{\text{общ}} = S_{\text{уд}}V$.

Удельную поверхность рассчитаем по формуле $S_{\text{уд}} = \frac{\sum_{i=1}^N S_{\text{д}\phi_i}}{\sum_{k=1}^N V_{\text{д}\phi_k}}$. Так как

частицы имеют форму куба, то площадь дисперсной фазы геометрически записывается как $6l^2$, а объем дисперсной фазы - l^3 . В связи с этим удельную площадь можно записать как $S_{\text{уд}} = \frac{6}{l}$ или $S_{\text{уд}} = 6D$.

Объем золь золота можно представить как $V = \frac{m}{\rho}$.

Тогда $S_{\text{общ}} = \frac{6Dm}{\rho} = \frac{6 \cdot 10^8 \cdot 10^{-3}}{19,6 \cdot 10^3} = 30,61 \text{ (м}^2\text{)}.$

Ответ: $S_{\text{общ}}=30,61 \text{ м}^2.$

2 Коллоидные частицы золота имеют дисперсность $D = 10^8 \text{ м}^{-1}$. Какой длины (L) будет нить, если 1 г кубиков золота расположить друг за другом. Плотность золота составляет $19,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Дано: $D=10^8 \text{ м}^{-1}$; $m=1 \text{ г}$; $\rho=19,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Найти: L -?

Решение:

Длина нити золота определяется произведением количества кубиков золота n на длину ребра одного кубика l - $L = nl$.

Так как длина ребра является поперечным размером куба, то ее можно вычислить, как $l = \frac{1}{D}$.

По определению число частиц золь есть отношение объема системы (дисперсной фазы) ($V_{\text{общ}}$) к объему одной кубической частицы ($V_{\text{куб}}$) -

$n = \frac{V_{\text{общ}}}{V_{\text{куб}}}$. Объем системы можно рассчитать используя соотношение

$V_{\text{общ}} = \frac{m}{\rho}$. Объем кубической частицы - l^3 .

Тогда длина нити золота равна $L = \frac{m}{\rho} D^2 = \frac{10^{-3}}{19,6 \cdot 10^3} \cdot (10^8)^2 = 5,1 \cdot 10^8 \text{ м}$.

Ответ: $L=5,1 \cdot 10^8 \text{ м}$.

3 Определите энергию Гиббса G_S поверхности капель водяного тумана массой 4 г, если плотность воды 998 кг/м^3 , поверхностное натяжение воды $72,75 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$, дисперсность частиц $5 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$.

Дано: $D=5 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$; $m=4 \text{ г}$; $\rho=998 \text{ кг/м}^3$; $\sigma=72,72 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^2$.

Найти: G_S -?

Решение:

Энергия Гиббса определяется как $G_S = S\sigma$.

Общая площадь поверхности каплей тумана равна $S_{\text{общ}} = S_{\text{уд}} V$.

Так как капля тумана представляет с собой сферическую частицу площадью - πd^2 , и объемом - $\pi \frac{d^3}{6}$, то удельная поверхность равна

$$S_{\text{уд}} = \frac{6}{d} = 6D.$$

Объем данной системы определяется как $V_{\text{общ}} = \frac{m}{\rho}$.

Энергия Гиббса поверхности равна:

$$G_s = \sigma \cdot 6D \frac{m}{\rho} = 72,75 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 5 \cdot 10^7 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-3}}{998} = 87,47 \text{ Дж}.$$

Ответ: $G_s = 87,47 \text{ Дж}$.

3 Задачи для самостоятельного решения

1 Приняв, что в золе серебра каждая частица представляет собой куб с длиной ребра $l = 4 \cdot 10^{-8}$ м, определите, сколько коллоидных частиц может получиться из $1 \cdot 10^{-4}$ кг серебра. Вычислите суммарную поверхность полученных частиц и рассчитайте поверхность одного кубика серебра с массой $1 \cdot 10^{-4}$ кг. Плотность серебра равна $10,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

2 Золя ртути состоит из шариков диаметром $1 \cdot 10^{-8}$ м. Чему равна суммарная поверхность частиц золя, образующихся из 1 г ртути? Плотность ртути равна $13,56 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

3 Вычислите удельную поверхность гидрозоль сульфида мышьяка As_2S_3 , средний диаметр частиц которого равен $1,2 \cdot 10^{-7}$ м, а плотность равна $3,43 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Ответ дайте в м^{-1} и в $\text{м}^2/\text{кг}$.

4 Определите величину удельной поверхности суспензии каолина плотностью $2,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, состоящей из шарообразных частиц со средним диаметром $0,5 \cdot 10^{-6}$ м. Суспензию считайте монодисперсной. Ответ дайте в

м^{-1} и в $\text{м}^2/\text{кг}$.

5 Найдите удельную поверхность угля, применяемого в современных топках для пылевидного топлива, если известно, что угольная пыль предварительно просеивается через сито с отверстиями $7,5 \cdot 10^{-5}$ м. Плотность угля $1,8 \text{ кг/м}^3$. Систему считайте монодисперсной. Ответ дайте в м^{-1} и в $\text{м}^2/\text{кг}$.

6 Удельная поверхность суспензии селена составляет $5 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$. Найдите общую поверхность частиц 3 г суспензии. Плотность селена равна $4,28 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

7 Вычислите удельную поверхность 1 кг угольной пыли с диаметром частиц, равным $8 \cdot 10^{-5}$ м. Плотность угля равна $1,8 \text{ кг/м}^3$.

8 Вычислите суммарную площадь поверхности 2 г платины, раздробленной на правильные кубики с длиной ребра $1 \cdot 10^{-8}$ м. Плотность платины равна $21,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

9 Вычислите суммарную площадь поверхности 1 г золота, раздробленного на правильные кубики с длиной ребра $5 \cdot 10^{-9}$ м. Плотность золота равна $19,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

10 Золя ртути состоит из шариков диаметром $6 \cdot 10^{-8}$ м. Чему равна суммарная поверхность частиц золя, образующихся из $0,5 \text{ см}^3$ ртути?

11 Допуская, что в коллоидном растворе золота каждая частица представляет собой куб с длиной ребра $2 \cdot 10^{-8}$ м, рассчитайте:

а) число частиц в 1 г золя золота;

б) общую площадь поверхности частиц золота. Плотность золота равна $19,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

12 Дисперсность золя ртути составляет $1,6 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$. Рассчитайте:

а) суммарную поверхность частиц 1 г ртути;

б) общее число частиц в растворе при дроблении 0,1 г ртути.

Примите, что частицы золя ртути имеют сферическую форму. Плотность ртути равна $13,56 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

13 Дисперсность частиц 2 г коллоидного золота составляет

$5 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$. Принимая форму частиц в виде кубиков, определите, какую поверхность они могут покрыть, если их плотно уложить в один слой. Плотность золота равна $19,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

14 Золь ртути состоит из сферических частиц диаметром $d=6 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Чему равна суммарная поверхность частиц золя, образующихся из $2,5 \text{ см}^3$ ртути?

15 Вычислите суммарную поверхность 250 г угольной пыли с диаметром частиц, равным $6 \cdot 10^{-5} \text{ м}$. Плотность угля равна $1,8 \text{ кг/м}^3$.

4 Примеры тестовых заданий

1 Признаками дисперсной системы являются оба условия...

- а) растворимость фазы в среде; равномерное распределение;
- б) дисперсность; летучесть среды;
- в) гетерогенность; летучесть фазы;
- г) дисперсность; равномерное распределение;
- д) растворимость фазы в среде; летучесть среды.

2 Для основной характеристики дисперсной системы используют обе величины...

- а) объем и поверхность частицы;
- б) массу и объем частицы;
- в) объем и массу всех частиц;
- г) объем и поверхность всех частиц;
- д) дисперсность и удельную поверхность частиц.

3 Термодинамически устойчивой является дисперсная система...

- а) лиофильный золь;
- б) лиофобный золь;
- в) суспензия;
- г) эмульсия;
- д) пена.

4 Для лиофобной дисперсной системы характерны оба фактора...

- а) термодинамически устойчива; при образовании системы $\Delta G > 0$;
- б) термодинамически неустойчива; при образовании системы $\Delta G < 0$;
- в) термодинамически устойчива; при образовании системы $\Delta G < 0$;
- г) термодинамически неустойчива; при образовании системы $\Delta G > 0$;
- д) термодинамически устойчива; при образовании системы $\Delta G = 0$.

5 Золев является дисперсная система с размером частиц...

- а) 10^{-5} м;
- б) 10^{-8} м;
- в) 10^{-6} м;
- г) 10^{-2} м;
- д) 10^{-11} м.

6 К конденсационным методам получения дисперсных систем относятся оба метода...

- а) электрораспыление и замена растворителя;
- б) ультразвуковое диспергирование и пептизация;
- в) пептизация и конденсация из паров;
- г) механическое диспергирование и реакция обмена;
- д) реакция гидролиза и замена растворителя.

7 При получении дисперсных систем должны выполняться все три условия...

- а) гетерогенность; дисперсность; растворимость фазы в среде;
- б) гетерогенность; наличие стабилизатора; растворимость фазы в среде;
- в) дисперсность; наличие стабилизатора; нерастворимость фазы в среде;
- г) гомогенность; дисперсность; нерастворимость фазы в среде;
- д) гомогенность; дисперсность; наличие стабилизатора.

8 Для очистки золь от ионных примесей используют оба метода...

- а) электрофорез и электроосмос;
- б) диализ и ультрафильтрацию;
- в) электрораспыление и электродиализ;
- г) диализ и фотоэлектроколориметрию;
- д) ультрафильтрацию и электроосмос.

5 Вопросы для самоконтроля

- 1 Какие системы называют дисперсными?
- 2 Почему золь можно назвать дисперсной системой?
- 3 Какими методами получают дисперсные системы?
- 4 Какие признаки характерны для дисперсных систем?
- 5 Почему термодинамические системы термодинамически неустойчивы?
- 6 Что такое удельная поверхность?
- 7 Что такое коэффициент формы?
- 8 Выведите соотношение между удельной поверхностью и дисперсностью для сферических частиц?
- 9 Чему равен коэффициент формы для кубических частиц?
- 10 Что такое поверхностная энергия?

6 Рекомендуемая литература

- 1 Вережников, В.Н. Избранные главы коллоидной химии / В.Н. Вережников – Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2011. – 188 с.
- 2 Замышляева, О.Г. Вопросы и задачи по курсу «Коллоидная химия» / О.Г. Замышляева Электронное учебное пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский университет, 2010. – 47 с.

2 ТЕРМОДИНАМИКА ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

1 Краткая теория

Термодинамика – наука о тепловых явлениях.

Классическая термодинамика базируется на следующих началах (законах):

1. **Нулевой закон.** Если каждая из двух термодинамических систем находится в тепловом равновесии с некоторой третьей, то они находятся в тепловом равновесии друг с другом, $A \approx B, B \approx C \Rightarrow A \approx C$.

2. **Первый закон.** Обобщенный закон сохранения энергии. Для любого термодинамического цикла сумма чистого тепла, доставленного в систему, и чистой работы, совершенной системой, равна нулю или в любом процессе полная энергия вселенной остается той же самой $dU = \delta Q - \delta W$.

3. **Второй закон.** Энтропия изолированной системы не в равновесии имеет тенденцию увеличиваться с течением времени, приближаясь к максимальному значению в равновесии ○

4. **Третий закон.** Энтропия любой системы при абсолютном нуле температуры всегда может быть принята равной нулю (*теорема Нернста*).

Поверхностное плавление

Реконструкция поверхностной фазы, большие амплитуды колебаний атомов и затрудненный обмен колебательной энергией с объемом создают благоприятные условия для различных структурных перестроек. С ростом температуры может реализовываться переход порядок-беспорядок, т.е. плавление, которое начинается с поверхности. Для грубой оценки начала подвижности структурных элементов решетки часто используют температуру Таммана

$$T_T = (0,3 \div 0,5)T_m,$$

где T_m – температура плавления.

В 1910 г. Линдеман предположил, что кристалл начинает плавиться, когда **среднеквадратичное смещение его атомов** $\langle x^2 \rangle$ достигает некоторой критической величины

$$\sqrt{\langle x^2 \rangle} = ca_0,$$

где c – коэффициент, в зависимости от типа решетки, принимает значения от 0,1 до 0,2 (для простой кубической – 0,1, для ОЦК – 0,15, для ГЦК-0,2); a_0 – период решетки. В дебаевском приближении из выражения

$$\langle x^2 \rangle = \frac{3kT}{Mv_q^2},$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура; M – масса вещества; v_q – дебаевская частота.

Температура плавления поверхностной фазы

$$T_m \cong (ca_0)^2 \frac{Mk\theta_D}{3h^2}, \quad (2.1)$$

где θ_D – температура Дебая; h – постоянная Планка.

Согласно уравнению (2.1) температура плавления поверхностной фазы всегда ниже температуры плавления объемного материала. Следовательно, плавление всегда начинается с поверхности, и фронт расплава движется внутрь кристалла. Зависимость толщины расплавленного слоя d от температуры описывается для металлов соотношением

$$d = d_0 (\ln(T_m - T))^{-1},$$

где d_0 – толщина металла.

Для молекулярных кристаллов

$$d = d_0 (\ln(T_m - T))^{-1/2},$$

где d_0 – толщина молекулярного кристалла.

Термодинамические основы гомогенного зародышеобразования (по Гиббсу-Фольмеру)

Работа образования зародыша новой фазы W может быть записана в виде

$$W = G_S - \frac{V_{\text{час}}}{V_m} (\mu_{\text{ст}} - \mu_{\text{н}}),$$

где $V_{\text{час}}$ – объем частицы (зародыша); V_m – молярный объем; $\mu_{\text{ст}}$ – значение химического потенциала в старой фазе; $\mu_{\text{н}}$ – значение химического потенциала в новой фазе.

Критический размер зародыша r_c

$$r_c = \frac{2\sigma V_m}{\mu_{\text{ст}} - \mu_{\text{н}}}.$$

Работа образования критического зародыша W_c

$$W_c = \frac{16\pi\sigma^3 V_m^2}{3(\mu_{\text{ст}} - \mu_{\text{н}})^2}.$$

Снижение химического потенциала за счет отклонения исходной фазы от стабильного состояния $\Delta\mu$

$$\Delta\mu = \Delta H_m \frac{T_m - T}{T_m},$$

где ΔH_m – энтальпия.

2 Примеры решения задач

1 Вычислите температуру плавления поверхности золота. Температура Дебая 170 К. Постоянная решетки 0,408 нм.

Дано: $\theta_D = 170 \text{ K}$; $M = 197 \text{ г / моль}$; $a_0 = 0,408 \text{ нм}$.

Найти: T_m – ?

Решение:

Температуру плавления поверхности золота рассчитаем по следующей

формуле $T_m \cong (ca_0)^2 \frac{Mk\theta_D}{3\hbar}$. Так как золото имеет гранцентрированную кубическую решетку, то коэффициент c принимает значение, равное 0,2.

$$T_m = (0,2 \cdot 0,408 \cdot 10^{-9})^2 \frac{197 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}}{3 \cdot (6,62 \cdot 10^{-34})^2} \cdot 170^2 = 664,5 \text{ К.}$$

Ответ: $T_m = 664,5 \text{ К.}$

2 Рассчитать среднеквадратичное смещение атомов при температуре 1000 К, для кристалла алюминия.

Дано: $T = 1000 \text{ К}$; $\theta_D = 394 \text{ К}$; $M = 27 \text{ г / моль}$.

Найти: $\sqrt{\langle x^2 \rangle}$ – ?

Решение:

Среднеквадратичное смещение атомов можно рассчитать, используя формулу $\langle x^2 \rangle = \frac{3kT}{Mv_q^2}$.

Частоту Дебая найдем из соотношения $h\nu_q = k\theta_D \Rightarrow \nu_q = \frac{k\theta_D}{h}$.

С учетом выражения для частоты Дебая, среднеквадратичное смещение атом равно $\langle x^2 \rangle = \frac{3Th^2}{Mk\theta_D} \Rightarrow \sqrt{\langle x^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3Th^2}{Mk\theta_D}}$.

$$\sqrt{\langle x^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1000 \cdot (6,62 \cdot 10^{-34})^2}{27 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 394^2}} = 1,17 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Ответ: $\sqrt{\langle x^2 \rangle} = 1,17 \text{ \AA}$.

3 Рассчитайте снижение химического потенциала при температуре 300 К, если температура плавления бензола при стандартном давлении 342 К. Энтальпия бензола 30720 Дж/моль.

Дано: $T = 300 \text{ К}$; $T_m = 342 \text{ К}$; $\Delta H_m = 30720 \text{ Дж / моль}$.

Найти: $\Delta\mu$ – ?

Решение:

Снижение химического потенциала за счет отклонения исходной фазы от стабильного состояния определяется соотношением $\Delta\mu = \Delta H_m \frac{T_m - T}{T_m}$.

$$\Delta\mu = 30720 \frac{342 - 300}{342} = 4300,8 \text{ Дж / моль.}$$

Ответ: $\Delta\mu = 4300,8 \text{ Дж / моль.}$

3 Задачи для самостоятельного решения

1 В резервуаре вместимостью 50 дм³ при 200 К и $0,5 \cdot 10^5$ Па содержится азот. Определите теплоту, которую необходимо передать газу, чтобы его давление стало бы $2 \cdot 10^5$ Па. Считать азот в данных условиях идеальным газом.

2 При 273 К и $1,013 \cdot 10^5$ Па нагревают 50 дм³ криптона до 873 К при постоянном объеме. Определите конечное давление газа и теплоту, затраченную на нагревание.

3 Какое количество теплоты необходимо для повышения температуры 16 г кислорода от 300 до 500 К при давлении 1 атм? Как при этом изменится внутренняя энергия?

4 Рассчитайте изменение энтропии при нагревании 11,2 дм³ азота от 0 до 50°C и одновременном уменьшении давления от 1 атм до 0.01 атм.

5 Найдите изменение свободной энергии Гиббса при испарении 10 г воды при 373 К и давлении $1,013 \cdot 10^5$ Па. Молярная теплота испарения воды при 373 К равна $4,059 \cdot 10^4$ Дж/моль. Каково соотношение между ΔH и $T\Delta S$ в этом процессе?

6 Вычислить температуру плавления поверхности алюминия.

7 Вычислить температуру плавления поверхности меди. Сравнить с табличным значением. Сделать вывод.

8 Построить распределение зависимости толщины расплавленного слоя для золота. Если толщина золота 10 мм. Температуру брать в диапазоне от 300 до 700 К, с шагом 50 К.

9 Построить распределение зависимости толщины расплавленного слоя для молекулярного кристалла. Если толщина молекулярного кристалла 50 мм. Температура плавления поверхности 1200 К. температуру брать в диапазоне от 400 до 1200 К, с шагом 50 К.

10 Для некоторого металла толщиной 100 мм при температуре 500 К толщина расплавленного слоя составила 17,7 мм. Определите температуру плавления данного металла.

11 Рассчитайте работу образования зародыша, если энергия поверхностного натяжения равна 87 Дж. Снижение химического потенциала составляет 3000 Дж/моль, а радиус получившегося зародыша 10^{-9} м.

12 Рассчитайте критический размер частицы, если поверхностная энергия натяжения равна 90 Дж, а площадь поверхности 30,61 м². Снижение химического потенциала 2500 Дж/моль.

13 Рассчитать работу образования критического зародыша если поверхностное натяжения составляет 0,003 Дж/м². Химический потенциал снизился на 1000 Дж/моль.

14 Рассчитать снижение химического потенциала, если температура плавления наноматериала составляет 1200 К. Температура среды 450 К. Энтальпия образования 4500 Дж/моль.

15 Рассчитать работу образования критического зародыша, если величина поверхностного натяжения составляет 0,02 Дж/м². Температура плавления материала 1400 К. Температура окружающей среды 300 К, а энтальпия образования данного вещества 20000 Дж/моль.

4 Примеры тестовых заданий

1 Для грубой оценки начала подвижности структурных элементов решетки часто используют температуру Таммана, которая составляет от температуры плавления...

а) $T_T = (0,1 \div 0,3)T_m$; б) $T_T = (0,3 \div 0,5)T_m$;

в) $T_T = (0,5 \div 0,7)T_m$; г) $T_T = (0,7 \div 0,9)T_m$.

2 Коэффициент пропорциональности между величиной среднеквадратичного смещения атомов и постоянной решетки, для твердого тела с решеткой типа ОЦК составляет...

а) 0,1; б) 0,15; в) 0,2; г) 0,25.

3 Температура Дебая поверхностной фазы составляет примерно от температуры Дебая для объемной фазы...

а) 0,3; б) 0,25; в) 0,5; г) 0,75.

4 Работа образования критического зародыша составляет от поверхностной энергии...

а) 1/3; б) 1/4; в) 1/2; г) 3/4.

5 Подход Таммана к объяснению снижения температуры плавления на поверхности основывался ...

а) на уменьшении амплитуды колебаний атомов и меньшей температуры Дебая;

б) на увеличении амплитуды колебаний атомов и меньшей температуры Дебая;

в) на увеличении амплитуды колебаний атомов и большей температуры Дебая;

г) на уменьшении амплитуды колебаний атомов и большей температуры Дебая.

6 В условиях равновесия насыщенный пар-жидкость давление пара над каплей...

а) равно атмосферному давлению;

б) равно давлению пара на плоской поверхностью жидкости;

в) больше давления над плоской поверхностью;

г) меньше давления над плоской поверхностью.

7 Удельная свободная поверхностная энергия твердых тел...

а) равна поверхностному натяжению на межфазной поверхности;

б) больше поверхностного натяжения на межфазной границе;

в) меньше поверхностного натяжения на межфазной границе;

г) эти величины не связаны между собой.

8 Укажите неверное утверждение. Поверхностное натяжение это...

а) работа образования единицы площади поверхности;

б) удельная избыточная свободная поверхностная энергия;

в) сила, противодействующая растяжению пленки;

г) суммарная энергия молекул поверхностного слоя.

5 Вопросы для самоконтроля

1 Что такое термодинамика?

2 Перечислите основные законы термодинамики?

3 Что такое равновесная термодинамика?

4 Какие начала термодинамики можно отнести к равновесной?

5 Что такое температура плавления?

6 Почему температура плавления поверхности отличается от температуры плавления объемного материала?

7 Что такое температура Дебая?

8 Термодинамические основы гомогенного зародышеобразования.

9 Гетерогенное образование новой фазы.

10 Плавление двухкомпонентного нанокристалла.

6 Список рекомендованной литературы

1 Малинская, В.П. Коллоидная химия в вопросах и ответах / В.П. Малинская, Р.М. Ахметханов Учебное пособие. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2013. – 156 с.

2 Морозова, Н.Б. Физическая и коллоидная химия: программа, контрольные задания, практикум / Н.Б. Морозова, С.Н. Грушевская и др. Учебно-методическое пособие. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2012. – 114 с.

3 ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

1 Краткая теория

К оптическим свойствам дисперсных систем относятся: поглощение, отражение, преломление, пропускание, рассеяние света.

1.1 Рассеяние света в дисперсных системах

Количественные закономерности **рассеяние света** для сферических частиц, не проводящих электрический ток, были выведены Релеем

$$I_p = I_0 \frac{24\pi^3 V^2 \nu \left(\frac{n_1^2 - n_0^2}{n_1^2 + 2n_0^2} \right)^2}{\lambda^4},$$

где I_0 и I_p – интенсивности падающего и рассеянного света; V – объем частицы; λ – длина волны падающего света; ν – частичная концентрация; n_1 и n_0 – показатели преломления дисперсной фазы и дисперсной среды.

Частичная концентрация связана с массовой концентрацией дисперсной фазы соотношением

$$C = V \rho \nu,$$

где C – массовая концентрация.

1.2 Ультрамикроскопия

Метод **ультрамикроскопии** основан на явлении рассеяния света коллоидными частицами.

Чтобы определить размер частицы с помощью ультрамикроскопа, через определенные промежутки времени считают число части n в определенном объеме V сильно разбавленного золя (берут среднее число из сотни подсчетов).

Масса частиц дисперсной фазы m в видимом объеме V равна

$$m = CV.$$

Масса одной частицы m_0

$$m_0 = \frac{m}{n} = \frac{CV}{n}.$$

Объем одной частицы дисперсной фазы V_0

$$V_0 = \frac{m_0}{\rho} = \frac{CV}{n\rho},$$

где ρ – плотность частиц дисперсной фазы.

1.3 Поглощение частиц и окраска золей

Свет, проходя через дисперсную систему, частично поглощается. Интенсивности падающего и прошедшего через дисперсную систему света связаны **законом Бугера-Ламберта-Бера**

$$I = I_0 \exp(-\varepsilon l C),$$

где I_0 и I – интенсивности падающего и прошедшего света; ε – коэффициент поглощения, характеризующий поглощающее вещество; l – толщина поглощающего слоя; C – концентрация дисперсной фазы.

Оптическая плотность A – логарифм отношения интенсивности падающего света к интенсивности прошедшего света

$$A = \lg\left(\frac{I_0}{I}\right).$$

На практике используют соотношения для нахождения **оптической плотности** в следующем виде

$$A = \frac{\varepsilon l C}{2,3}.$$

2 Примеры решения задач

1 При исследовании гидрозоля серебра с помощью ультрамикроскопа в видимом объеме подсчитано 10 частиц. Площадь поля зрения составляет $4,5 \cdot 10^{-8}$ м², глубина пучка $8 \cdot 10^{-10}$ м. Приняв форму частиц за шарообразную, вычислите их средний радиус. Массовая концентрация золя составляет $3 \cdot 10^{-5}$ кг/м³, плотность серебра равна $10,5 \cdot 10^3$ кг/м³.

Дано: $n = 10$; $S = 4,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$; $h = 8 \cdot 10^{-10} \text{ м}$; $C = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} / \text{ м}^3$;

$\rho = 10,5 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{ м}^3$.

Найти: r – ?

Решение:

Так как по условию задачи частицы имеет форму шара, то объем данной частицы может быть представлен как $V_0 = \frac{4}{3} \pi r^3$.

С другой стороны объем частицы одной дисперсной фазы может быть вычислен как $V_0 = \frac{CV}{n\rho}$.

Средний радиус частиц вычислим по уравнению $r = \sqrt[3]{\frac{3CV}{4\pi n\rho}}$.

Объем раствора в поле зрения микроскопа равен произведению площади поля зрения микроскопа S на глубину пучка h - $V = Sh$.

В итоге окончательное выражение для расчета среднего радиуса частиц примет вид $r = \sqrt[3]{\frac{3CSh}{4\pi n\rho}}$.

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 3 \cdot 10^{-5} \cdot 4,5 \cdot 10^{-8} \cdot 8 \cdot 10^{-10}}{4\pi \cdot 10 \cdot 10,5 \cdot 10^3}} = 2,9 \cdot 10^{-8} \text{ м}.$$

Ответ: $r = 2,9 \cdot 10^{-8} \text{ м}$.

2 Получены следующие значения процента прохождения лучей света I через слой коллоидного раствора различных концентраций C и толщины l :

Концентрация C , %	0,8	0,4	0,1
Толщина слоя $l \cdot 10^3$, м	2,5	2,5	5
Процент прошедшего света, %	1,3	9	30

Для проверки применимости закона Бугера – Ламберта – Бера вычислите коэффициент поглощения ϵ для каждой концентрации коллоидного раствора.

Дано:

Концентрация C , %	0,8	0,4	0,1
Толщина слоя $l \cdot 10^3$, м	2,5	2,5	5
Процент прошедшего света, %	1,3	9	30

Найти: ε – ?

Решение:

Выражение для расчета оптической плотности имеет вид $A = \lg\left(\frac{I_0}{I}\right)$.

С другой стороны оптическую плотность можно рассчитать как $A = \frac{\varepsilon l C}{2,3}$.

Приравнявая два этих выражения выразим коэффициент поглощения, получим выражение $\varepsilon = \frac{2,3(\lg I_0 - \lg I)}{Cl}$.

С учетом, что $I_0 = 100$ %, рассчитаем значение коэффициента поглощения, для каждой концентрации раствора

$$\varepsilon = \frac{2,3 \cdot (\lg 100 - \lg 1,3)}{0,8 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} = 2,2 \cdot 10^3.$$

$$\varepsilon = \frac{2,3 \cdot (\lg 100 - \lg 9)}{0,4 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} = 2,4 \cdot 10^3.$$

$$\varepsilon = \frac{2,3 \cdot (\lg 100 - \lg 30)}{0,1 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 2,4 \cdot 10^3.$$

Ответ: Вычисленные значения коэффициента поглощения для различных концентраций раствора имеют близкие значения, следовательно, закон Бугера-Ламберта-Бера применим.

3 Задачи для самостоятельного решения

1 Раствор золя золота с массовой концентрацией частиц $5 \cdot 10^{-5}$ кг/м³ исследовали под ультрамикроскопом. Среднее число частиц в поле зрения площадью 10^{-6} м² и глубиной пучка $2 \cdot 10^{-6}$ м равно 65. Полагая, что частицы золя золота имеют сферическую форму, вычислите их

средний радиус. Плотность золота равна $19,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

2 Проверьте графически применимость закона Бугера–Ламберта–Бера к гидрозоль кубового синего красителя, используя экспериментальные данные спектрофотометрического метода:

$C \cdot 10^3, \text{кг/м}^3$	5	10	15	25	35	50
A	0,05	0,10	0,15	0,24	0,34	0,47

Определите концентрацию золя при $A = 20$.

3 Длина волны красного света равна 760 нм, а длина волны синего света равна 430 нм. В каком случае интенсивность рассеянного света будет больше и во сколько раз?

4 При ультрамикроскопическом исследовании гидрозоля серебра в кювете площадью $5,4 \cdot 10^{-12}$ м² и глубиной пучка света $2,5 \cdot 10^{-4}$ м подсчитано 2 частицы. Рассчитайте среднюю длину ребра частицы, принимая их форму за кубическую. Массовая концентрация золя серебра равна 0,02 кг/м³, плотность серебра составляет $10,5 \cdot 10^3$ кг/м³.

5 При прохождении лучей света (при $\lambda = 0,6$ мкм) были получены следующие значения процента прохождения лучей I через слой золя мастики различных концентраций C и толщины l :

Концентрация $C, \%$	0,6	0,2	0,1
Толщина слоя $l \cdot 10^3, \text{м}$	2,5	2,5	5
Процент прошедшего света, %	27	63,9	65,8

Для проверки применимости закона Бугера – Ламберта – Бера вычислите коэффициент поглощения ϵ для каждой концентрации золя мастики.

6 В процессе переработки сиропа при производстве сахара радиус частиц увеличился с 20 до 80 нм. Как изменится интенсивность рассеянного света, если интенсивность падающего света, концентрация и плотность частиц остались неизменными?

7 Используя уравнение Релея, сравните интенсивности светорассеяния двух эмульсий с равными радиусами частиц и концентрациями:

бензола в воде ($n_1 = 1,50$) и бензина в воде ($n_1 = 1,38$). Показатель преломления воды $n_0 = 1,33$.

8 При исследовании гидрозоля Fe_2O_3 с помощью ультрамикроскопа в видимом объеме $4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3$ было подсчитано 3 частицы. Принимая, что частицы золя сферические и плотность равна $5,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, определите средний радиус частиц гидрозоля. Массовая концентрация гидрозоля равна $8,5 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^3$.

9 Проверьте графически применимость закона Бугера – Ламберта – Бера к гидрозолю кубового синего красителя, используя экспериментальные данные спектрофотометрического метода:

$C \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3$	10	20	30	40	50	60
A	0,1	0,2	0,29	0,38	0,47	0,55

Определите концентрацию золя при $A = 45$.

10 В каком случае и во сколько раз интенсивность светорассеяния латекса полистирола будет больше: при освещении светом с длиной волны $\lambda_1 = 530 \text{ нм}$ или с длиной волны $\lambda_2 = 680 \text{ нм}$?

11 С помощью метода поточной ультрамикроскопии в объеме равном $2,2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3$ подсчитано 80 частиц дыма мартеновских печей. Массовая концентрация аэрозоля равна 10^{-4} кг/м^3 , плотность составляет $2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Рассчитайте среднюю длину ребра частицы, принимая их форму за кубическую.

12 При прохождении лучей света (при $\lambda = 0,47 \text{ мкм}$) через коллоидные растворы гидроксида железа различных концентраций C и толщины l были получены следующие значения процента прохождения лучей I :

Концентрация $C, \%$	0,1	0,08	0,02
Толщина слоя $l \cdot 10^3, \text{ м}$	2,5	2,5	5
Процент прошедшего света, %	5,9	10,9	32,5

Для проверки применимости закона Бугера – Ламберта – Бера вычислите коэффициент поглощения ε для каждой концентрации золя

гидроксида железа.

13 Сравните интенсивности рассеяния света золями с радиусом частиц 15 и 75 нм. В каком случае и насколько интенсивность рассеяния света будет больше?

14 Используя уравнение Релея, сравните интенсивности света, рассеянного двумя эмульсиями с равными радиусами частиц и концентрациями: бензола в воде ($n_1 = 1,501$) и н-пентана в воде ($n_1 = 1,357$). Показатель преломления воды $n_0 = 1,333$.

15 Методом поточной ультрамикроскопии в объеме $1,5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3$ подсчитано 53 частицы аэрозоля масляного тумана. Считая форму частиц сферической, определите их средний радиус. Массовая концентрация золя составляет $2,1 \cdot 10^{-5} \text{ кг/ м}^3$, плотность равна $0,92 \cdot 10^{-3} \text{ кг/ м}^3$.

4 Примеры тестовых заданий

1 При каком условии спектр поглощения коллоидного раствора не зависит от размера частиц дисперсной фазы...

- а) $D/\lambda \ll 1$; б) $D/\lambda \gg 1$; в) $\lambda/D \ll 1$; г) $\lambda/D \gg 1$.

2 Электромагнитными взаимодействиями между дипольными моментами кластеров можно пренебречь, в том случае, когда фактор заполнения приблизительно равен...

- а) 10^2 ; б) 10^{-1} ; в) 10^{-2} ; г) 10^{-4} .

3 Коэффициент поглощения зависит от коэффициента заполнения по...

- а) линейному закону;
б) квадратичному закону;
в) кубическому закону.

4 Каким(и) фактором(ами) определяется частота колебания поверхностного плазмона...

а) диэлектрической проницаемостью среды и коэффициентом отражения;

б) диэлектрической проницаемостью среды и матрицей;

в) матрице и коэффициентом отражения;

г) коэффициентом поглощения.

5 С уменьшением размера нанокристалла уменьшается ширина электронных и дырочных зон, при этом общая энергия ...

а) не изменяется;

б) уменьшается;

в) сначала уменьшается, затем увеличивается;

г) увеличивается.

6 Интенсивность рассеянного света пропорционально длине волны падающего света по закону...

а) прямой пропорциональности;

б) обратной пропорциональности;

в) квадратичному;

г) кубическому.

5 Вопросы для самоконтроля

1 На каком явлении основан метод ультрамикроскопии?

2 Что такое рассеяние света?

3 Перечислите основные выкладки с уравнения Рэлея.

4 Запишите уравнение Рэлея.

5 Что такое оптическая плотность?

6 Что такое коэффициент поглощения?

7 В чем заключается суть аналитической проверки применимости закона Бугера-Ламберта-Бера?

8 Перечислите основные оптические свойства дисперсных систем.

9 Как определить размер частицы с помощью метода ультрамикроскопии?

10 Для каких систем используют явление рассеяния света?

6 Рекомендуемая литература

1 Елисеев, А.А. Функциональные наноматериалы / А.А. Елисеев, А.В. Лукашин. – М: ФИЗМАЛИТ, 2010. – 456 с.

2 Малинская, В.П. Коллоидная химия в вопросах и ответах / В.П. Малинская, Р.М. Ахметханов Учебное пособие. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2013. – 156 с.

4 МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

1 Краткая теория

К молекулярно-кинетическим свойствам дисперсных систем относятся: *диффузия, броуновское движение, осмос, седиментационное равновесие.*

1.1 Диффузия

Диффузия – самопроизвольное выравнивание концентраций под влиянием теплового движения, приводящее к выравниванию химических потенциалов во всем объеме системы.

Диффузионный поток (J_D) – масса вещества, проходящего за единицу времени через условную единичную поверхность, расположенную перпендикулярно направлению потока

$$J_D = \frac{1}{S} \frac{dm}{dt}.$$

Первый закон Фика (1855): диффузионный поток прямо пропорционален градиенту концентрации вещества

$$J_D = -D \frac{dC}{dx} = -D \text{grad} C,$$

где $-D \frac{dC}{dx} = -D \text{grad} C$ - градиент концентрации.

Коэффициент диффузии – число атомов, проходящих через единичную площадку в 1 см^2 за 1 с .

$$D = \frac{RT}{6\pi N_a \eta r} = \frac{kT}{6\pi \eta r},$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура; η – вязкость дисперсной среды; r – радиус диффундирующих частиц; N_a – число Авогадро.

1.2 Броуновское движение

Броуновское движение – беспорядочное движение частиц дисперсной фазы под действием тепловых ударов молекул дисперсной среды.

Для характеристики броуновского движения Эйнштейном и Смолуховским было введено понятие **среднего смещения (сдвига) частицы** (броуновской площадки) $\Delta\bar{x}$

$$\Delta\bar{x} = \sqrt{\frac{(\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2 + \dots + (\Delta x_n)^2}{n}},$$

где $\Delta x_1, \Delta x_n$ – отдельные проекции смещения частицы на ось x ; n – число проекций.

Величина среднего смещения частицы связана с физическими характеристиками системы уравнением Эйнштейна-Смолуховского

$$\Delta\bar{x} = \sqrt{2Dt},$$

где t – время.

1.3 Осмос

Осмос – процесс самопроизвольного перехода молекул растворителя через полупроницаемую мембрану. Давление, которое нужно приложить к системе, чтобы прекратился осмос, называется **осмотическим давлением** π

$$\pi = CRT,$$

где C – концентрация растворенного вещества.

В дисперсных системах вместо молярной концентрации вводят понятие **частичной концентрации** ν – число кинетических единиц (коллоидных частиц) в единице объема системы (1 м^3).

Частичная концентрация частиц связана с молярной концентрацией соотношением $\nu = CN_a$, тогда получаем

$$\pi = \frac{\nu}{N_a} RT.$$

Таким образом, осмотическое давление пропорционально числу частиц, принимающих участие в тепловом движении.

1.4 Седиментационное равновесие

Седиментация – осаждение частиц, размеры которых не превышают 10^{-7} м, под действием силы тяжести.

Скорость седиментации U , при которой происходит полное осаждение частиц с некоторой высоты, равна

$$U = \frac{H}{t},$$

где H – высота, с которой происходит осаждение частиц; t – время полного осаждения частиц

Скорость седиментации для сферических частиц

$$U = \frac{2r^2}{9\eta}(\rho - \rho_0)g,$$

где ρ – плотность частицы дисперсной фазы; ρ_0 – плотность дисперсионной среды; g – ускорение свободного падения.

Распределение монодисперсных частиц по высоте подчиняется гипсометрическому закону Лапласа-Перрена

$$\ln \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_a V g}{RT}(\rho - \rho_0)(h_2 - h_1),$$

где v_1 и v_2 – число частиц в единице объема на расстояниях h_1 и h_2 от дна сосуда; V – объем сосуда.

2 Примеры решения задач

1 Коэффициент диффузии вещества в воде при 291 К составляет $6,25 \cdot 10^{-10}$ м²/с. Вязкость воды равна $1,06 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м². Вычислите радиус молекулы (в м) и молярную массу органического вещества. Плотность вещества составляет $1,618 \cdot 10^3$ кг/м³.

Дано:

$$T = 291\text{K}; \eta = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{H} \cdot \text{c} / \text{м}^2; D = 6,25 \cdot 10^{-10} \text{м}^2 / \text{с}; \rho = 1618 \text{кг} / \text{м}^3.$$

Найти: r, M – ?

Решение:

Радиус молекулы вещества рассчитаем по формуле

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r} \Rightarrow r = \frac{kT}{6\pi\eta D}$$

$$r = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 291}{6\pi \cdot 1,06 \cdot 10^{-3} \cdot 6,25 \cdot 10^{-10}} = 3,22 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Получим выражение для расчета молекулярной массы. Молекулярная масса может быть представлена в виде $M = mN_a$.

Запишем выражение для объема сферической частицы через геометрические параметры $V = \frac{4}{3}\pi r^3$, с другой стороны тот же объем

рассчитывается через соотношение $V = \frac{m}{\rho} = \frac{M}{\rho N_a}$,

В итоге выражение для расчета молекулярной массы примет вид

$$M = \frac{4}{3}\pi r^3 N_a \rho.$$

$$M = \frac{4}{3}\pi \cdot (3,22 \cdot 10^{-10})^2 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1618 = 136 \text{ г} / \text{моль}.$$

Ответ: $r = 3,22 \cdot 10^{-10} \text{ м}; M = 136 \text{ г} / \text{моль}.$

2 Вычислите проекцию среднего смещения частиц эмульсии с радиусом $6,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ за 1 с . Вязкость среды равна $1 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$, температура составляет 288 К . Чему равен коэффициент диффузии частиц эмульсии?

Дано: $r = 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}; t = 1 \text{ с}; \eta = 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2; T = 288 \text{ К}.$

Найти: $\Delta \bar{x}$ – ?

Решение:

Проекцию среднего смещения частиц эмульсии рассчитаем по формуле $\Delta \bar{x} = \sqrt{2Dt}$.

Коэффициент диффузии можно вычислить через соотношение $D = \frac{kT}{6\pi\eta r}$

С учетом выражения для коэффициента диффузии, выражение для расчета среднего смещения частиц эмульсии примет вид $\Delta \bar{x} = \sqrt{\frac{kTt}{3\pi\eta r}}$.

$$\Delta \bar{x} = \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 288 \cdot 1}{3\pi \cdot 10^{-3} \cdot 6,5 \cdot 10^{-6}}} = 2,55 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

Ответ: $\Delta \bar{x} = 2,55 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$

3 Гидрозо́ль золота состоит из частиц радиусом 10^{-9} м. На какой высоте при 27°C число частиц в золе уменьшится в два раза? Плотность золота $19,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, плотность воды $1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Дано: $r = 10^{-9} \text{ м}; T = 300 \text{ К}; \frac{v_1}{v_2} = 2; \rho = 19,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \rho_0 = 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Найти: $\Delta h - ?$

Решение:

Высоту, на которой число частиц уменьшится в два раза найдем из выражения $\ln \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_a V g}{RT} (\rho - \rho_0)(h_2 - h_1)$, выражая из этого выражения

высоту, получим соотношение $\Delta h = \ln \frac{v_1}{v_2} \frac{kT}{Vg(\rho - \rho_0)}$.

Объем сферических частиц вычислим по формуле $V = \frac{4}{3} \pi r^3$.

Окончательное выражение для расчета высоты $\Delta h = \ln \frac{v_1}{v_2} \frac{3kT}{4\pi r^3 g(\rho - \rho_0)}$.

$$\Delta h = \ln 2 \cdot \frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{4\pi \cdot (10^{-9})^3 \cdot 9,81 \cdot (19,6 - 1) \cdot 10^3} = 3,76 \text{ м.}$$

Ответ: $\Delta h = 3,76$ м.

3 Задачи для самостоятельного решения

1 Вычислите радиус частицы золя золота, если за 60 с она переместилась на $1,065 \cdot 10^{-5}$ м при температуре 20°C и вязкости среды $\eta = 1 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м².

2 Коэффициент диффузии тростникового сахара в воде при 291 К составляет $3,9 \cdot 10^{-5}$ м²/сутки. Вязкость воды равна $1,06 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м². Вычислите радиус молекулы (в м) и молярную массу органического вещества. Плотность тростникового сахара составляет $1,587 \cdot 10^3$ кг/м³. Полученное значение молярной массы сравните с теоретическим ($M = 342$ г/моль).

3 Вычислите осмотическое давление аэрозоля дыма мартеновских печей при 20°C , если массовая концентрация частиц аэрозоля составляет $0,8$ кг/м³, радиус частиц равен $1,1 \cdot 10^{-8}$ м, плотность частиц равна $2,2 \cdot 10^3$ кг/м³.

4 Число сферических частиц гидрозоля золота, находящегося в равновесии в поле силы тяжести, равно 386. Чему равно число частиц в слое, лежащем на $1 \cdot 10^{-4}$ м выше, если средний диаметр частиц равен $6,6 \cdot 10^{-8}$ м, температура 19°C , плотность золота равна $19,6 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность воды составляет $0,998 \cdot 10^3$ кг/м³.

5 Вычислите проекцию среднего смещения частиц гидрозоля с радиусом $1 \cdot 10^{-7}$ м за 4 с. Вязкость среды $\eta = 1 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м², температура 293 К. Чему равен коэффициент диффузии частиц гидрозоля (в м²/с и м²/сутки)?

6 Коэффициент диффузии коллоидного золота составляет $2,7 \cdot 10^{-5}$ м²/сутки при 285 К и вязкости равной $1,21 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м². Вычислите радиус коллоидных частиц золота.

7 Осмотическое давление водного раствора гемоглобина при 15°C равно $483,9$ Н/м². Концентрация раствора составляет $3,43$ кг/м³.

Вычислите молярную массу гемоглобина.

8 Определите скорость оседания частиц радиусом $1 \cdot 10^{-6}$ м, образующихся после помола кофе в воде ($\eta = 10^{-3}$ Н·с/м²) и в воздухе ($\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Н·с/м²). Плотность кофе составляет $1,1 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность воды равна 10^3 кг/м³, плотность воздуха $1,025$ кг/м³. Во сколько раз скорость оседания частиц кофе в воздухе больше скорости их оседания в воде?

9 Среднее смещение коллоидных частиц платины в ацетоне при температуре 17°C за 16 с составило $6,2 \cdot 10^{-6}$ м. Вязкость ацетона при заданной температуре $\eta = 3,2 \cdot 10^{-4}$ Н·с/м². Вычислите радиус частиц золя платины и их коэффициент диффузии.

10 Коэффициент диффузии молочного сахара в воде при 291 К составляет $3,94 \cdot 10^{-5}$ м²/сутки. Вязкость воды равна $1,06 \cdot 10^{-3}$ Н·с/м². Вычислите радиус молекулы (в м) и молярную массу органического вещества. Плотность тростникового сахара равна $1,542 \cdot 10^3$ кг/м³. Полученное значение молярной массы сравните с теоретическим ($M = 324 \text{ г/моль}$).

11 Вычислите осмотическое давление коллоидных частиц золота при 20°C , если массовая концентрация частиц золя равна $0,5$ кг/м³, диаметр частиц равен $2 \cdot 10^{-9}$ м, плотность золота равна $19,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

12 При подсчете числа частиц гидрозоль селена на двух уровнях, находящихся друг от друга на расстоянии $1 \cdot 10^{-4}$ м, на нижнем уровне оказалось 733 частицы, на верхнем 444 частицы. Температура 19°C , плотность селена равна $4,27 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность воды равна 998 кг/м³. Вычислите средний радиус частиц селена, приняв их форму сферической.

13 Проекция среднего смещения коллоидных частиц золота при 18°C за 4 с равна $1,8 \cdot 10^{-8}$ м, вязкость среды $\eta = 10^{-3}$ Н·с/м². Вычислите радиус частиц золя золота и их коэффициент диффузии в данных условиях.

14 Коэффициент диффузии мальтозы в воде при 291 К

составляет $3,92 \cdot 10^{-5}$ м²/сутки. Вязкость воды равна $1,06 \cdot 10^{-3}$ Н·с/ м². Вычислите радиус молекулы (в м) и молярную массу органического вещества. Плотность мальтозы составляет $1,540 \cdot 10^3$ кг/м³. Полученное значение молярной массы сравните с теоретическим ($M = 342$ г/моль).

15 Осмотическое давление коллоидного раствора 0,1014 кг золота, диспергированного в 1 м³ при 25°C, равно 98,06 Н/м². Определите радиус частиц золя золота, предполагая, что форма частиц сферическая. Плотность золота составляет $19,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

4 Примеры тестовых заданий

1 Осмотическое давление коллоидных растворов по сравнению с осмотическим давлением истинных растворов равной молярной концентрации ...

а) меньше; б) больше; в) одинаково; г) отсутствует.

2 Мерой интенсивности броуновского движения коллоидных частиц является...

а) сумма всех смещений частицы по всем направлениям в единицу времени;

б) среднее арифметическое значение всех смещений;

в) среднее арифметическое значение проекций смещения на произвольно выбранную ось;

г) среднее арифметическое значение квадратов смещений частиц.

3 Механизм броуновского движения коллоидных частиц дисперсной фазы в дисперсионной среде заключается в том, что...

а) частицы дисперсной фазы движутся в поле тяжести;

б) частицы сталкиваются между собой и передают импульс в произвольном направлении;

в) молекула дисперсионной среды сталкиваются с частицами и передают им импульс;

г) молекулы дисперсионной среды сталкиваются между собой и

передают импульс частицам.

4 Коэффициент диффузии не зависит от...

- а) концентрации;
- б) радиуса диффундирующих частиц;
- в) вязкости;
- г) скорости седиментации.

5 Седиментация – осаждение частиц, размеры которых превышают...

- а) 10^{-7} м;
- б) 10^{-8} м;
- в) 10^{-9} м;
- г) 10^{-10} м.

5 Вопросы для самоконтроля

1 Что такое диффузия?

2 Основные параметры диффузии?

3 Что такое коэффициент диффузии?

4 Что такое седиментация?

5 Что такое осмотическое давление?

6 От чего зависит скорость седиментация?

7 Что такое броуновское движение?

8 Что является характеристикой броуновского движения?

9 Законы Фика.

10 Что такое седиментационное равновесие?

6 Рекомендуемая литература

1 Малинская, В.П. Коллоидная химия в вопросах и ответах / В.П. Малинская, Р.М. Ахметханов Учебное пособие. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2013. – 156 с.

2 Морозова, Н.Б. Физическая и коллоидная химия: программа, контрольные задания, практикум / Н.Б. Морозова, С.Н. Грушевская и др. Учебно-методическое пособие. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2012. – 114 с.

5 ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА НАНОСИСТЕМ

1 Краткая теория

Минимальная частота ω , которой ограничен фононный спектр со стороны низкочастотных колебаний

$$\omega = \frac{c}{2D},$$

где c – скорость света; D – наибольший размер частицы.

Функция распределения частот $g(\omega)$ фононного спектра малой частицы прямоугольной формы, с ребрами L_x, L_y, L_z имеет вид

$$g(\omega) = \frac{V\omega^2}{2\pi^2c_3} + \frac{S\omega}{8\pi c_2} + \frac{L}{16\pi c_1},$$

где $V = L_x L_y L_z$ - объем частицы прямоугольной формы;

$S = 2(L_x L_y + L_x L_z + L_y L_z)$ - площадь поверхности частицы;

$L = 4(L_x + L_y + L_z)$ - общая длина ребер.

c_1, c_2, c_3 - скорости продольных и поперечных упругих колебаний.

Средняя энергия осциллятора ε

$$\varepsilon(\omega, T) = \frac{\hbar}{2} \coth\left(\frac{\hbar}{2kT}\right),$$

где \hbar - приведенная постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Дебаевский вклад теплоемкости C_θ

$$C_\theta = \frac{12}{5} \pi^4 R \left(\frac{T}{\theta}\right)^3,$$

где R – газовая универсальная постоянная; θ - температура Дебая.

Теплоемкость малой частицы $C_V(r)$ описывается выражением

$$C_V(r) = a_3 VT^3 + a_2 ST^2 + a_1 LT,$$

где a_1, a_2, a_3 - некоторые константы.

Общее число мод сферической частицы N

$$N = \frac{2}{9\pi} r^3 k_n^3 + \frac{1}{4} r^2 k_n^2 + \frac{2}{3\pi} r k_n,$$

где k_n - граничный волновой вектор; r - радиус сферической частицы.

Удельная электропроводность металлических наноматериалов λ

$$\lambda = \frac{ne^2 l}{m\nu},$$

где n - концентрация электронов проводимости; e - заряд электронов; l - длина свободного пробега; m - масса электрона; ν - скорость электрона.

Удельное сопротивление металлических наноматериалов ρ

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{l}{h} \right),$$

где ρ_0 - удельное сопротивление монокристаллического материала; h - толщина пленки.

2 Примеры решения задач

1 Рассчитайте минимальную частоту, которой ограничен фононный спектр низкочастотных колебаний для веществ MnO ($D=11$ нм).

Дано: $D = 11$ нм.

Найти: ω - ?

Решение:

В наночастицах могут возникать волны, длина которых не превышает удвоенный размер частицы, поэтому со стороны низкочастотных колебаний

фононный спектр ограничен некоторой минимальной частотой $\omega = \frac{c}{2D}$.

$$\omega = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 11 \cdot 10^{-9}} = 1,36 \cdot 10^{16} \text{ рад / с.}$$

Ответ: $\omega = 1,36 \cdot 10^{16} \text{ рад / с.}$

2 Рассчитайте среднюю энергию осциллятора для частицы малой формы, если частота осциллятора равна 10^{13} Гц, а температура 300 К.

Дано: $\nu = 10^{13}$ Гц; $T = 300$ К.

Найти: $\varepsilon - ?$

Решение:

Средняя энергия осциллятора определяется соотношением $\varepsilon(\omega, T) = \frac{\hbar}{2} \cdot \frac{\hbar}{(2kT)}$. Циклическая частота и линейная частота связаны следующим образом $\omega = 2\pi\nu$. С учетом этого, выражение для расчета средней энергии примет вид $\varepsilon(\omega, T) = \pi\hbar \left(\frac{\nu}{2kT} \right)$.

$$\varepsilon = \pi \cdot 1,05 \cdot 10^{-34} \cdot 10^{13} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi \cdot 1,05 \cdot 10^{-34} \cdot 10^{13}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \right) = 0,29 \text{ мЭВ}.$$

Ответ: $\varepsilon = 0,29$ мЭВ.

3 Задачи для самостоятельного решения

1 Рассчитайте минимальную частоту, которой ограничен фононный спектр низкочастотных колебаний для веществ MgO ($D=11, 16$ и 23 нм).

2 Рассчитайте минимальную частоту, которой ограничен фононный спектр низкочастотных колебаний для веществ TiN ($D=30$ нм).

3 Рассчитайте значение объема, площади и общей длины ребер малой частицы прямоугольной форму, если их ребра L_x, L_y, L_z равны соответственно 8, 10 и 12 нм.

4 Рассчитайте значение объема, площади и общей длины ребер малой частицы прямоугольной форму, если их ребра L_x, L_y, L_z равны соответственно 10, 12 и 15 нм. Постройте функцию распределения частот, рассчитанных для MgO из первой задачи. Коэффициенты c_1, c_2 и c_3 принять равными единицам.

5 Рассчитайте среднюю энергию осциллятора для частицы малой формы, если частота осциллятора равна 10^{12} Гц, а температура 400 К.

6 Рассчитайте теплоемкость Дебая для массивного кристалла серебра при температуре 400 К, и для нанопорошка серебра при температуре 400 К.

7 Рассчитайте теплоемкость Дебая для нанопорошка меди при температуре 600 К.

8 Рассчитайте теплоемкость Дебая для массивного кристалла золота при температуре 500 К, и для нанопорошка серебра при температуре 500 К. Какая теплоемкость больше и во сколько раз? Объясните, полученный результат.

9 Рассчитать значение граничного волнового вектора для массивного кристалла меди.

10 Рассчитать значение граничного волнового вектора для массивного кристалла золота.

11 Для описания теплоемкости при температурах от 1 – 20 К используется полином $C(T)=aT+bT^2+cT^3$. При температурах 10, 15 и 20 К были получены следующие значения теплоемкости: 0.295, 0.825 и 2,17 Дж/(моль·К). Рассчитайте константы a , b и c и определите их размерность.

12 Рассчитать удельную электропроводность нанометаллического порошка золота, с энергией 15 эВ и длиной свободного пробега 0,1 нм.

13 Рассчитать удельную электропроводность нанометаллического порошка серебра. Скорость электронов 1 Мм/с, длина свободного пробега 0,2 нм.

14 Рассчитать удельное сопротивление металлической пленки толщиной 10 нм, и длиной свободного пробега 1 нм. Если сопротивление монокристаллического материала 10^{-5} Ом·см.

15 Рассчитать удельное сопротивление монокристаллического материала, если толщина пленки, которая изготавливалась из данного материала 1 нм, длина свободного пробега 0,5 нм. Удельное сопротивление пленки 10^{-6} Ом·см.

4 Примеры тестовых заданий

1 Основной причиной изменения термодинамических свойств нанокристаллов в сравнении с массивным веществом является...

- а) изменение вида фононного спектра;
- б) изменение границ фононного спектра;
- в) изменение и вида, и границ фононного спектра.

2 В фононном спектре малых частиц появляются...

- а) низкочастотные моды, отсутствующие массивным кристаллам;
- б) высокочастотные моды, отсутствующие массивным кристаллам;
- в) низкочастотные моды, как и в массивных кристаллах;
- г) высокочастотные моды, как и в массивных кристаллах.

3 Особенности колебательного спектра наночастиц в первую очередь будут отражаться на...

- а) теплоемкости;
- б) теплопроводности
- в) коэффициенте линейного расширения.

4 Со стороны низкочастотных колебаний фононный спектр ограничен частотой...

а) $\omega = \frac{c}{D}$; б) $\omega = \frac{c}{2D}$; в) $\omega = \frac{c}{3D}$; г) $\omega = \frac{c}{4D}$.

5 При низких температурах теплоемкость достаточно корректно описывается законом...

- а) Дюлонга-Пти; б) Дебая; в) Эйнштейна.

5 Вопросы для самоконтроля

1 Что такое фононный спектр?

2 Чем ограничена минимальная частота фононного спектра?

3 Что такое теплоемкость?

4 Изобразите график теплоемкости от температуры.

5 Как соотносятся температура Дебая для наночастиц и массивных кристаллов?

6 Что такое температура Дебая?

7 Что такое теплопроводность?

8 Что такое длина свободного пробега?

9 Что такое электропроводность?

10 Что такое работа выхода?

6 Рекомендуемая литература

1 Елисеев, А.А. Функциональные наноматериалы / А.А. Елисеев, А.В. Лукашин. – М: ФИЗМАЛИТ, 2010. – 456 с.

2 Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2005. – 416 с.

6 ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

- 1 Начала термодинамики, термодинамические потенциалы, теория фазовых равновесий.
- 2 Термодинамика поверхности.
- 3 Неравновесная термодинамика, синергетика.
- 4 Процессы на поверхности: поверхностное натяжение, капиллярные явления.
- 5 Поверхностная энергия и ее анизотропия.
- 6 Обработка поверхности и условия сохранения ее свойств.
- 7 Атомная структура чистых поверхностей. Релаксация и реконструкция.
- 8 Поверхностные фазы в субмонослойных системах адсорбат-подложка. Фазовая диаграмма.
- 9 Модель террас-ступеней-изломов. Дефекты: адатомы, вакансии, дефекты замещения, дислокации, доменные границы. Ступени, сингулярные и вицинальные поверхности, фасетки.
- 10 Адсорбция. Зависимость от покрытия, температуры, угла и кинетической энергии.
- 11 Термическая десорбция. Кинетика. Десорбционная спектроскопия.
- 12 Изотермы адсорбции. Нетермическая десорбция.
- 13 Поверхностная диффузия. Законы Фика. Диффузия отдельного атома и химическая диффузия.
- 14 Собственная диффузия и диффузия массопереноса. Анизотропия поверхностной диффузии.
- 15 Атомные механизмы поверхностной диффузии: прыжковый, атомного обмена, туннелирования, обменный.
- 16 Экспериментальные методы изучения диффузии: прямое наблюдение за атомами, метод изменения профиля, капиллярные методы, метод островков.

17 Механизмы роста на поверхности: Франка-ван дер Мерве, Вольмера – Вебера, Странского – Крастанова.

18 Зарождение и рост островков: режимы зарождения при малых покрытиях, режим промежуточных покрытий, режим агрегации, режим коалесценции и перколяции.

19 Концентрация островков, форма (разветвленные, компактные, фрактальные), распределение по размеру.

20 Коалесценция и созревание островков. Магические островки, островки вакансий.

21 Кинетические эффекты в гомоэпитаксии. Внутрислойный и межслойный массоперенос. Барьер Эрлиха – Швобеля.

22 Кинетические эффекты в гомоэпитаксии. Рост за счет движения ступеней, послойный и многослойный рост.

23 Эффекты механических напряжений при гетероэпитаксии.

24 Рост пленок в присутствии сурфактантов. Сурфактанты и интерфактанты. Механизмы действия сурфактантов.

25 Объекты нанометрового масштаба и пониженной размерности. Классификация и методы получения нанокластеров и наноструктур.

26 Уравнения и характеристики условий термодинамической стабильности межфазных границ в наносистемах.

27 Кристаллы и кристаллиты, кластеры. Размерные эффекты. Термодинамическая и квантово-статистическая модели кластеров. Оболочечная и структурная модели.

28 Структурные особенности твердотельных наноструктур. Дефекты и напряжения. Структурные фазовые переходы. Механические и тепловые свойства.

29 Матричные и супрамолекулярные нанокластеры и наноструктуры.

30 Оптические и электронные свойства наносистем и наноматериалов.

31 Магнитные свойства наносистем и наноматериалов.

32 Физико-химические эффекты в туннельно-зондовой нанотехнологии.

Атомные манипуляции с помощью СТМ.

33 Графен, фуллерены и углеродные нанотрубки.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Драгунов, В.П. Основы нанoeлектроники: учебное пособие для вузов / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин. – М.: Физматкнига, 2006; М.: Логос, 2006; М.: Университетская книга, 2006. – 494 с.
- 2 Кормилицын, О.П. Механика материалов и структур нано- и микротехники: учебное пособие для вузов / О. П. Кормилицын, Ю. А. Шукейло. – М.: Академия, 2008. – 215 с.
- 3 Старостин, В.В. Материалы и методы нанотехнологии: учебное пособие / В. В. Старостин; ред. Л. Н. Патрикеев. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 431 с.
- 4 Смирнова, К.И. Процессы микро- и нанотехнологии: учебное пособие / К. И. Смирнова. – Томск: ТУСУР, 2006. – 183 с.
- 5 Горшков, В.И. Основы физической химии: учебник для вузов / В. И. Горшков, И. А. Кузнецов. – 3-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 407 с.
- 6 Оура, К. Введение в физику поверхности / К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма. – М.: Наука, 2006. – 490 с.
- 7 Ролдугин, В.И. Физикохимия поверхности. – М.: Интеллект, 2008. – 568 с.
- 8 Щука, А.А. Нанoeлектроника. – М.: Физматкнига, 2007. – 463 с.
- 9 Андриевский, Р.А. Наноструктурные материалы: учебное пособие для студ. высш. учебн. заведений/ Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 192 с.
- 10 Рыжонков, Д.И. Наноматериалы: учебное пособие / Д.И. Рыжонков, Левина В.В., Дзидзигури Э.Л.. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 365 с.
- 11 Сергеев, Г.Б. Нанохимия: учебное пособие / Г.Б. Сергеев. – М.: КДУ, 2007. – 336 с.

12 Смирнов, С.В. Физика твердого тела: учебное пособие / С. В. Смирнов. – Томск: Издательство научно-технической литературы, 2003. – 273 с.

13 Наноструктуры в электронике и фотонике: пер. с англ. / ред. Ф. Рахман; пер. Ю. А. Заболотная; ред. пер. Е. Л. Свинцов. – М.: Техносфера, 2010. – 343 с.

14 Дронов, А.А. Физикохимия наноструктурированных материалов: лабораторный практикум / А.А. Дронов, А.В. Железнякова, М.Ю. Назаркин. – М.: МИЭТ, 2011. – 76 с.