



**В. Ф. Марков, Т. А. Алексеева,  
Л. А. Брусницына, Л. Н. Маскаева**

# **КОЛЛОИДНАЯ ХИМИЯ ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ВУЗОВ**

*Рекомендовано методическим советом УрФУ в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программе бакалавриата по направлениям подготовки «Химическая технология», «Биотехнология», «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», «Пожарная безопасность», «Техносферная безопасность»*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе  
[biblio-online.ru](http://biblio-online.ru)**

**Москва ■ Юрайт ■ 2016  
Екатеринбург ■ Издательство Уральского университета**

УДК 544.7(075.8)

ББК 24.6я73

М26

*Авторский коллектив — сотрудники кафедры физической и коллоидной химии Химико-технологического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина:*

**Марков Вячеслав Филиппович** — доктор химических наук, профессор;

**Алексеева Татьяна Анатольевна** — кандидат химических наук, доцент;

**Брусницына Людмила Александровна** — доцент, кандидат химических наук;

**Маскаева Лариса Николаевна** — доктор химических наук, профессор.

**Рецензенты:**

кафедра химической технологии древесины, биотехнологии и наноматериалов Уральского государственного лесотехнического университета (заведующий кафедрой — кандидат технических наук, профессор *Юрьев Ю. Л.*);

*Зуев М. Г.* — доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник Института химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук.

**Марков, В. Ф.**

М26

Коллоидная химия. Примеры и задачи : учеб. пособие для вузов / В. Ф. Марков [и др.] ; под науч. ред. В. Ф. Маркова. — М. : Издательство Юрайт, 2016 ; Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та. — 186 с. — Серия : Университеты России.

ISBN 978-5-9916-9876-4 (Издательство Юрайт)

ISBN 978-5-7996-1922-0 (Изд-во Урал. ун-та)

Серия «Университеты России» позволит высшим учебным заведениям нашей страны использовать в образовательном процессе учебники и учебные пособия по различным дисциплинам, подготовленные преподавателями лучших университетов России и впервые опубликованные в издательствах университетов. Все представленные в этой серии учебники прошли экспертную оценку учебно-методического отдела издательства и публикуются в оригинальной редакции.

В пособии изложены основные разделы коллоидной химии: количественные характеристики, образование, строение лиофильных и лиофобных дисперсных систем, их молекулярно-кинетические и оптические свойства, седиментационный анализ, адсорбция, смачивание, капиллярные и электрокинетические явления, кинетика коагуляции. Каждый раздел содержит основные теоретические положения, примеры решения типовых задач и задачи для самостоятельной проработки.

*Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по естественнонаучным специальностям.*

УДК 544.7(075.8)

ББК 24.6я73



*Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».*

ISBN 978-5-9916-9876-4  
(Издательство Юрайт)

ISBN 978-5-7996-1922-0  
(Изд-во Урал. ун-та)

© Марков В. Ф., Алексеева Т. А., Брусницына Л. А.,  
Маскаева Л. Н., 2015

© Уральский федеральный университет, 2015

© ООО «Издательство Юрайт», 2016

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Коллоидная химия – это наука о физико-химических свойствах дисперсных систем и поверхностных явлениях. Вследствие исключительно большой роли коллоидных систем и коллоидно-химических процессов в различных областях техники и человеческой деятельности и благодаря накоплению теоретического и практического материала, она выделилась в самостоятельную научную дисциплину. Объектами ее изучения являются гетерофазные системы, в которых одна из фаз находится в высокодисперсном (раздробленном) состоянии.

Трудно назвать какую-либо сферу человеческой деятельности, в которой бы не использовались коллоидные системы или коллоидные процессы. Поверхностные явления (смачивание, адгезия, адсорбция, коагуляция, седиментация и др.) лежат в основе таких процессов химической технологии, как измельчение, гранулирование, сушка, фильтрация, флотация, спекание, склеивание, крашение. К наиболее распространенным дисперсным системам относят дымы и туманы, эмульсии, пены, суспензии, порошки, пыли, гели. Дисперсными системами являются продукты питания, лекарства, биологические ткани. В мире каждый год производится сотни миллионов тонн дисперсных веществ и материалов. Знание закономерностей, присущих дисперсным системам, необходимо не только для оптимизации технологических процессов, но и при получении материалов с заданными свойствами, а также при решении задач охраны окружающей среды.

Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплины «Коллоидная химия» и «Поверхностные явления и дисперсные системы». Авторы разработали пособие, отвечающее современным требованиям и способствующее организации как аудиторной, так и самостоятельной работы студентов.

В основу пособия вошли задачи, составленные крупным ученым в области коллоидной химии профессором С. Г. Мокрушиным (1896–1986), основателем на Урале коллоидно-химической школы по исследованию поверхностных явлений и ламинарных системах, условий образования и устойчивости тонких и ультратонких твердофазных пленок на межфазных границах (см.: Задачи по физико-химии коллоидно-дисперсных систем и поверхностных явлений. Свердловск : Изд-во УПИ им. С. М. Кирова. Вып. 1–8. 1954–1978).

Пособие дополнено задачами, составленными авторами с использованием экспериментальных данных из оригинальных статей и монографий, а также изложенными в задачниках, приведенных в перечне используемой литературы. Авторы стремились, чтобы основные вопросы коллоидной химии нашли отражение в приведенных соответствующих задачах.

Сборник состоит из 10 разделов, содержащих более 250 задач. В начале каждого раздела приведен краткий теоретический материал, в котором большое внимание уделяется вопросам, которые недостаточно полно описаны в учебниках, приведены основные формулы для расчетов, а также примеры решения типовых задач. Далее по каждой теме представлены задачи для самостоятельного решения студентами при выполнении ими домашних заданий.

# 1. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

## 1.1. Определение размера частиц и удельной поверхности

Дисперсные системы всегда гетерогенные (гетерофазные). Они состоят из дисперсной фазы и дисперсионной среды.

Объектам изучения коллоидной химии присущи два основных признака:

- 1) гетерогенность или многофазность (качественный признак).
- 2) дисперсность (количественный признак) определяется размерами частиц в трех измерениях.

Основные характеристики, используемые для описания дисперсных систем:

1. Характеристический размер частиц –  $a$ ; [м].

Для сферических частиц это диаметр сферы  $d$ , для кубических – ребро куба  $l$ .

2. Дисперсность (раздробленность)  $D$  – это величина, обратная наименьшему размеру частиц.

$$D = \frac{1}{a} \left[ \text{м}^{-1} \right]. \quad (1.1)$$

3. Удельная поверхность  $S_{\text{уд}}$  – это межфазная поверхность ( $S_{1,2}$ ), приходящаяся на единицу объема дисперсной фазы ( $V$ ) или ее массы ( $m$ ).

$$S_{\text{уд}}^V = \frac{S_{1,2}}{V} \left[ \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3} = \frac{1}{\text{м}} \right], \quad S_{\text{уд}}^m = \frac{S_{1,2}}{m} \left[ \frac{\text{м}^2}{\text{кг}} \right]. \quad (1.2)$$

Рассмотрим, как определяется удельная поверхность: если система состоит из  $n$  частиц, то

$$S_{уд}^V = \frac{S_{1,2}}{V} = \frac{S_{ч-цы} \cdot n}{V_{ч-цы} \cdot n} = \frac{S_{ч-цы}}{V_{ч-цы}}, \quad (1.3)$$

$$S_{уд}^m = \frac{S_{1,2}}{m} = \frac{S_{ч-цы} \cdot n}{m_{ч-цы} \cdot n} = \frac{S_{ч-цы}}{m_{ч-цы}} = \frac{S_{ч-цы}}{V_{ч-цы} \cdot \rho_{ч-цы}} = \frac{S_{1,2}}{V_{ДФ} \cdot \rho_{ДФ}} = \frac{S_{уд}^V}{\rho_{ДФ}}. \quad (1.4)$$

Для кубических частиц  $S_{уд}^V = \frac{6l^2}{l^3} = \frac{6}{l} = 6D$ .

Для сферы  $S_{уд}^V = \frac{\pi \cdot d^2}{\frac{1}{6}\pi \cdot d^3} = \frac{6}{d} = 6D$ .

В общем виде  $S_{уд}^V = \frac{k}{d} = k \cdot D$ , где  $k$  – коэффициент формы, тогда

$$S_{уд}^m = \frac{k}{d \cdot \rho} = \frac{k \cdot D}{\rho}. \quad (1.5)$$

Коэффициенты формы для сферических, кубических частиц  $k = 6$ , для пленок  $k = 2$ , для волокон  $k = 4$ .

С увеличением дисперсности или уменьшением размера частиц возрастает удельная поверхность.

## 1.2. Методы получения дисперсных систем

Для получения дисперсных систем используют две группы методов: диспергационные и конденсационные (табл. 1.1).

**Диспергирование** – метод получения дисперсных систем путем измельчения или дробления конденсированного тела.

**Конденсация** – метод получения дисперсных систем за счет объединения или агрегатирования молекул, или ионов вещества.

## Методы получения дисперсных систем

Получение дисперсных систем	
Диспергирование	Конденсация
Механическое диспергирование: выветривание горных пород, растирание в ступке, шаровая мельница, коллоидная мельница)	Физическая конденсация молекул: – из паров
Ультразвуковое диспергирование	– при замене растворителя
Распыление в электрической дуге	Химическая конденсация: – реакции осаждения, обмена, гидролиза, окисления – восстановления; – образование туманов, облаков, нерастворимых частиц в атмосфере и природных водах
Пептизация: переход нерастворимых частиц почв, грунтов в природные воды (пригоден только для свежеприготовленных осадков)	

Дробление веществ до частиц малых размеров требует большой затраты работы, так как поверхность раздела между фазами в таких системах весьма велика. Однако с помощью механических методов диспергирования даже в присутствии стабилизаторов практически невозможно получение частиц с размерами менее 100 нм. В случае диспергирования одной жидкости в другой (несмешивающейся с первой) процесс называется *эмульгированием*. И в этом случае требуется почти обязательное присутствие в системе веществ – эмульгаторов, стабилизирующих ее дисперсный состав (поверхностно-активных веществ, полимеров, порошков). Таким образом, обычно получают частицы радиусом не меньше 500 нм.

Более высокая дисперсность системы может быть достигнута при использовании методов, основанных на агрегации атомов и молекул, т. е. методов конденсации. Именно эти методы чаще всего используются для получения истинно-коллоидных растворов.

Образование дисперсных систем при использовании конденсационных методов происходит в результате либо гетерогенного зарождения, когда возникновение новой фазы осуществляется

на уже имеющихся поверхностях (стенках сосуда, частицах посторонних веществ – ядрах конденсации), либо на поверхностях зародышей, возникающих самопроизвольно в гомогенной среде.

Зародыши в этом случае могут возникать лишь при определенном критическом пересыщении раствора.

Степень пересыщения

$$\gamma = P/P_s \text{ или } \gamma = c/c_s,$$

где  $P$  – давление пересыщенного пара;  $P_s$  – давление насыщенного пара;  $c$  – концентрация в пересыщенном растворе;  $c_s$  – концентрация в насыщенном растворе.

Критическая степень пересыщения связана с критическим радиусом  $r_{кр}$  следующим соотношением:

$$\ln \gamma_{кр} = \frac{2\sigma V_M}{RT r_{кр}}. \quad (1.6)$$

Самопроизвольное возникновение ядер конденсации зависит от многих причин: химических свойств реагирующих веществ, от характера ассоциации атомов и молекул, вязкости среды, температуры и др.

Процесс образования дисперсной фазы при конденсации имеет две основные стадии:

- 1) возникновение центров конденсации;
- 2) рост зародышей.

Дисперсность получаемых коллоидных систем зависит от соотношения скорости образования зародышей ( $v_1$ ) и скорости их роста ( $v_2$ ). При малой скорости образования зародышей ( $v_1 < v_2$ ), в системе образуется небольшое число достаточно крупных частиц. Если же скорость возникновения зародышей велика, а скорость их роста мала ( $v_1 > v_2$ ) в системе, наоборот, возникает большое число мелких частиц. В этом случае образуются высокодисперсные золи, размер частиц в которых позволяет отнести их к коллоидным растворам.



## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

### Пример 1.1.

Методом механического диспергирования 5 г толуола в 1 л воды получена дисперсная система с частицами толуола шарообразной формы с радиусом  $2,5 \cdot 10^{-7}$  м. Плотность толуола равна  $0,867$  г/см<sup>3</sup>.

### Решение:

1. Определяем дисперсность системы  $D$  и удельную поверхность  $S_{\text{уд}}$ .

$$D = \frac{1}{a} \text{ для шарообразной частицы } a = 2r, \text{ т. е.}$$

$$D = \frac{1}{a} = \frac{1}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-7}} = 2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1},$$

$$S_{\text{уд}}^V = 6D = 6 \cdot 2 \cdot 10^6 = 12 \cdot 10^6 \frac{\text{М}^2}{\text{М}^3},$$

$$S_{\text{уд}}^m = \frac{6D}{\rho} = \frac{6 \cdot 2 \cdot 10^6}{0,867 \cdot 10^3} = 13,8 \cdot 10^3 \frac{\text{М}^2}{\text{кг}}.$$

Плотность переведем в систему СИ:

$$\rho = 0,876 \text{ г/см}^3 = 0,876 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

2. Рассчитываем параметры шарообразной частицы толуола.

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 (2,5 \cdot 10^{-7})^3 = 6,54 \cdot 10^{-20} \text{ м}^3,$$

$$S_0 = 4\pi \cdot r^2 = 4 \cdot 3,14 (2,5 \cdot 10^{-7})^2 = 7,85 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2,$$

$$m_0 = \rho \cdot V = 0,867 \cdot 10^3 \cdot 6,54 \cdot 10^{-20} = 5,67 \cdot 10^{-17} \text{ кг}.$$

3. Рассчитываем общую поверхность частиц  $S$  и число частиц  $N$  в дисперсной системе.

И с п о с о б.  $S = S_{\text{уд}}^V \cdot V$ , где  $V$  – объем всех частиц,

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{0,876 \cdot 10^3} = 5,767 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3,$$

тогда  $S = S_{\text{уд}}^V \cdot V = 12 \cdot 10^6 \cdot 5,767 \cdot 10^{-6} = 69,2 \text{ м}^2$ .

Число частиц определим, как объем всех частиц разделим на объем одной частицы  $N = \frac{V}{V_0} = \frac{5,767 \cdot 10^{-6}}{6,54 \cdot 10^{-20}} = 8,82 \cdot 10^{13}$  шт.

**П с о б.** Число частиц определим, как массу всех частиц разделим на массу одной частицы

$$N = \frac{m}{m_0} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{5,67 \cdot 10^{-17}} = 8,82 \cdot 10^{13} \text{ шт.}$$

$$S = N \cdot S_0 = 8,82 \cdot 10^{13} \cdot 7,85 \cdot 10^{-13} = 69,2 \text{ м}^2.$$

### Пример 1.2.

Дисперсность частиц коллоидного золота равна  $10^8 \text{ м}^{-1}$ . 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  $19,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

**Решение:**

1. Поскольку  $S_{\text{уд}}^V = \frac{S_{1,2}}{V}$ , то общая поверхность частиц коллоидного золота равна  $S_{1,2} = S_{\text{уд}}^V \cdot V$ .

2. Удельная поверхность кубических частиц:  $S_{\text{уд}}^V = 6D$ .

3. Объем золья золота связан с массой золья:  $V = m/\rho$ .

$$\text{Тогда } S_{1,2} = \frac{6 \cdot D \cdot m}{\rho} = \frac{6 \cdot 10^8 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{19,6 \cdot 10^3} = 30,61 \text{ м}^2.$$

### Пример 1.3.

Коллоидные частицы золота имеют дисперсность  $D = 108 \text{ м}^{-1}$ . Какой длины ( $L$ ) будет нить, если 1 г кубиков золота расположить друг за другом. Плотность золота составляет  $19,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

#### Решение:

1. Длина нити золота равна произведению количества кубиков золота ( $n$ ) на длину ребра одного кубика:  $L = n \cdot l$ .

2. Длина ребра кубика обратно пропорциональна дисперсности:  $l = 1/D$ .

3. Число частиц золя равно общему объему золя  $V_{\text{общ}}$ , деленному на объем одного кубика золота  $V_{\text{куб}}$ :  $n = \frac{V_{\text{общ}}}{V_{\text{куб}}}$ .

4. Общий объем золя равен:  $V_{\text{общ}} = \frac{m}{\rho}$ .

5. Объем одного кубика золота равен:  $V_{\text{куб}} = l^3$ .

6. Тогда длина нити золота будет равна:

$$L = \frac{V_{\text{общ}}}{V_{\text{куб}}} \cdot l = \frac{m}{\rho \cdot l^3} \cdot l = \frac{m}{\rho \cdot l^2} = \frac{m}{\rho} \cdot D,$$

$$L = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{19,6 \cdot 10^3} \cdot (10^8)^2 = 5,1 \cdot 10^8 \text{ м} = 5,1 \cdot 10^5 \text{ км}.$$

## ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

**1.1.** Массовая концентрация мучной пыли в воздухе рабочих зон помещения мукомольных предприятий составляет  $4,2 \text{ мг/м}^3$ . Определить численную концентрацию мучной пыли, если средний диаметр частиц составляет  $3,7 \text{ мкм}$ , а их плотность равна  $1,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

**1.2.** Суспензия кварца содержит сферические частицы, причем 30 % объема приходится на частицы, имеющие радиус  $1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ , а объем остальных – на частицы радиуса  $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ . Какова удельная поверхность кварца?

**1.3.** 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  $10,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

**1.4.** Золь ртути состоит из шариков диаметром  $1 \cdot 10^{-8}$  м. Чему равна суммарная поверхность частиц золя, образующихся из 1 г ртути? Плотность ртути равна  $13,56 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

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

**1.6.** Определите величину удельной поверхности суспензии каолина плотностью  $2,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, состоящей из шарообразных частиц со средним диаметром  $0,5 \cdot 10^{-6}$  м. Суспензию считайте монодисперсной. Ответ дайте в м<sup>-1</sup> и в м<sup>2</sup>/кг.

**1.7.** 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 равна  $1,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Систему считайте монодисперсной. Ответ дайте в м<sup>-1</sup> и в м<sup>2</sup>/кг.

**1.8.** Удельная поверхность суспензии селена составляет  $5 \cdot 10^5$  м<sup>-1</sup>. Найдите общую поверхность частиц 3 г суспензии. Плотность селена равна  $4,28 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

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

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

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

**1.12.** Золь ртути состоит из шариков диаметром  $6 \cdot 10^{-8}$  м. Чему равна суммарная поверхность частиц золя, образующихся из 0,5 см<sup>3</sup> ртути?

**1.13.** 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  $19,6 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

**1.14.** Дисперсность золя ртути составляет  $1,6 \cdot 10^7$  м<sup>-1</sup>. 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  $13,56 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

**1.15.** Дисперсность частиц 2 г коллоидного золота составляет  $5 \cdot 10^7$  м<sup>-1</sup>. Принимая форму частиц в виде кубиков, определите, какую поверхность они могут покрыть, если их плотно уложить в один слой. Плотность золота равна  $19,6 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

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

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

**1.18.** Определите величину удельной поверхности суспензии каолина (плотность равна  $2,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), если шарообразные частицы суспензии имеют дисперсность  $2 \cdot 10^6$  м<sup>-1</sup>. Суспензию считайте монодисперсной. Ответ дайте в м<sup>-1</sup> и в м<sup>2</sup>/кг.

**1.19.** Золь ртути состоит из шариков радиусом  $3 \cdot 10^{-7}$  м. Чему равна суммарная поверхность частиц золя, образующихся из 300 г ртути? Плотность ртути равна  $13,56 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

**1.20.** При изготовлении эмульсии масла в воде диаметр капель при машинном перемешивании составляет  $4 \cdot 10^{-6}$  м, а при ручном взбалтывании  $2 \cdot 10^{-5}$  м. Найдите, во сколько раз удельная площадь поверхности эмульсии масла при машинном перемешивании больше, чем при ручном взбалтывании. Плотность масла равна  $0,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

**1.21.** Какой длины будет нить золота, если 50 г кубиков золота расположить друг за другом. Плотность золота равна  $19,6 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Длина ребра кубика золота составляет  $4 \cdot 10^{-7}$  м.

**1.22.** Рассчитайте средний диаметр частиц силикагеля, если его удельная поверхность равна  $8,3 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$ , а плотность  $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$ .

**1.23.** Какова общая поверхность 5 кг угля, если средний радиус частиц равен  $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ ? Плотность угля составляет  $1800 \text{ кг/м}^3$ .

**1.24.** Рассчитайте удельную объемную и удельную массовую поверхность 5 г эмульсии бензола в воде дисперсностью  $D = 2 \text{ мкм}^{-1}$  при температуре 313 К. Плотность бензола при этой температуре равна  $0,858 \text{ г/см}^3$ .

**1.25.** Дана дисперсная система с массой дисперсной фазы  $m$ , плотностью дисперсной фазы  $\rho$ , с частицами дисперсной фазы определенной формы и размера:  $r$  – радиус шара,  $l$  – длина ребра куба (варианты заданий приведены в табл. 1.2).

1. Рассчитайте дисперсность системы  $D$  и удельную поверхность  $S_{\text{уд}}$ .

2. Рассчитайте параметры частицы дисперсной фазы: объем  $V_0$ , поверхность  $S_0$ , массу  $m_0$ .

3. Рассчитайте общую поверхность всех частиц  $S$  и число частиц  $N$  в дисперсной системе.

Т а б л и ц а 1.2

### Варианты заданий

Вариант	Дисперсная фаза	Дисперсионная среда	Форма частиц	$r$ ( $l$ ), м	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$m$ , кг
1	Сера	Вода	Куб	$2 \cdot 10^{-8}$	2,07	1
2	Платина	Вода	Куб	$4 \cdot 10^{-8}$	21,4	2
3	Пыль угольная	Воздух	Шар	$8 \cdot 10^{-5}$	1,8	10
4	Бензол	Вода	Шар	$8 \cdot 10^{-7}$	0,86	5
5	Ртуть	Вода	Шар	$6 \cdot 10^{-8}$	13,55	4
6	Пыль мучная	Воздух	Шар	$5 \cdot 10^{-5}$	0,82	8
7	Платина	Вода	Куб	$9 \cdot 10^{-9}$	21,4	6
8	Серебро	Вода	Куб	$4 \cdot 10^{-8}$	10,5	0,1

О к о н ч а н и е т а б л . 1.2

Вариант	Дисперсная фаза	Дисперсионная среда	Форма частиц	$r$ ( $l$ ), м	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$m$ , кг
9	Вода	Воздух	Шар	$2 \cdot 10^{-7}$	0,997	5
10	Сера	Вода	Куб	$1 \cdot 10^{-7}$	2,07	3
11	Ртуть	Воздух	Шар	$2 \cdot 10^{-7}$	13,55	0,5
12	Золото	Вода	Куб	$4 \cdot 10^{-9}$	19,3	1
13	Масло растительное	Вода	Шар	$4 \cdot 10^{-6}$	0,92	4
14	Ртуть	Вода	Шар	$8 \cdot 10^{-8}$	13,55	2
15	Пудра сахарная	Воздух	Шар	$6 \cdot 10^{-5}$	0,85	5
16	Толуол	Вода	Шар	$2 \cdot 10^{-6}$	0,87	0,8
17	Серебро	Вода	Куб	$5 \cdot 10^{-8}$	10,5	7
18	Камфара	Вода	Шар	$1 \cdot 10^{-6}$	0,99	1
19	Пыль угольная	Воздух	Куб	$6 \cdot 10^{-5}$	1,8	8
20	Золото	Вода	Шар	$8 \cdot 10^{-9}$	19,3	2
21	Селен	Вода	Шар	$2,8 \cdot 10^{-7}$	4,28	0,3
22	Глина	Вода	Шар	$5,6 \cdot 10^{-6}$	2,7	0,04
23	AgCl	Вода	Шар	$3 \cdot 10^{-6}$	5,6	2
24	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Вода	Шар	$2,9 \cdot 10^{-9}$	4	0,2
25	Ag <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Вода	Шар	$6 \cdot 10^{-8}$	3,43	1

## 2. ТЕРМОДИНАМИКА МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

### 2.1. Природа поверхностной энергии. Поверхностное натяжение

Наиболее важной характеристикой поверхности является поверхностное натяжение  $\sigma$ .

Поверхностное натяжение – это избыточная энергия, приходящаяся на единицу площади поверхности:

$$\sigma = \frac{\Delta G}{S} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right]. \quad (2.1)$$

Физическая природа поверхностного натяжения в нескомпенсированности поля межмолекулярных сил на межфазных поверхностях.

Поверхностное натяжение характеризует различия в интенсивности межмолекулярных взаимодействий граничащих фаз. Чем сильнее межмолекулярные связи в веществе, тем больше поверхностное натяжение на его межфазной поверхности.

С термодинамической точки зрения, поверхностное натяжение определяется частной производной от любого термодинамического потенциала по величине площади межфазной поверхности при постоянстве других параметров. Используя потенциал Гиббса ( $G$ ), можно записать

$$\sigma = \left( \frac{\partial G}{\partial S} \right)_{p, T, n_i}, \quad (2.2)$$

где  $p$  – давление;  $T$  – температура;  $n_i$  – число молей компонентов.



Поверхностная энергия является частью свободной энергии системы в целом. В самопроизвольных процессах эта энергия может быть снижена либо за счет уменьшения площади поверхности и изменения ее формы, либо за счет снижения поверхностного натяжения.

## 2.2. Факторы, влияющие на поверхностное натяжение

Поверхностное натяжение на границе раздела фаз между жидкостью и газом определяют следующие факторы: химическая природа вещества, температура, природа граничащих фаз, наличие примесей, заряд поверхности, кривизна поверхности жидкости.

Энергия межмолекулярных взаимодействий зависит от температуры, а значит, имеет выраженную температурную зависимость.

Взаимосвязь поверхностного натяжения, температуры и полной поверхностной энергии (внутренней энергии поверхностного слоя)  $U_s$  выражается уравнением Гиббса – Гельмгольца:

$$U_s = \sigma - T \left( \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right)_p, \quad (2.3)$$

где  $\left( \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right)_p$  – температурный коэффициент поверхностного натяже-

ния, измеряемый в  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right]$ .

Для многих однокомпонентных жидкостей зависимость  $\sigma = f(T)$  близка к линейной (рис. 2.1). При линейном характере этой зависимости производная  $a = d\sigma/dT$  для данного вещества имеет постоянное значение вплоть до критической температуры  $T_c$ , при которой  $\sigma = 0$ .

Для многих веществ температурные коэффициенты поверхностного натяжения находятся в диапазоне от  $-0,1$  до  $0,2$  мДж/(м<sup>2</sup>·К).

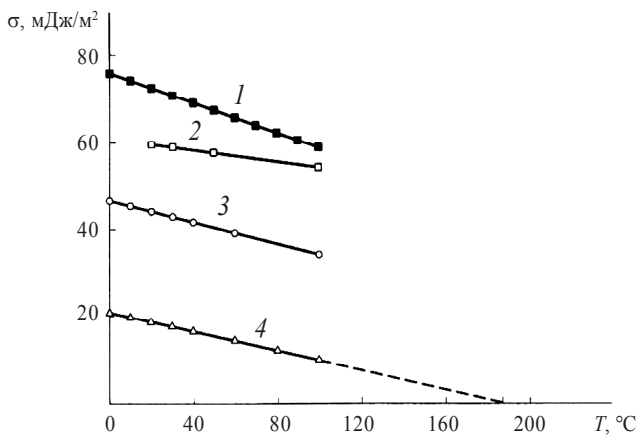


Рис. 2.1. Зависимость поверхностного натяжения жидкостей от температуры: вода (1), глицерин (2), нитробензол (3), гексан (4).

Пересечение пунктирной линии с осью абсцисс определяет критическую температуру гексана  $T_c$ .

С повышением температуры поверхностное натяжение уменьшается, а теплота образования единицы площади поверхности увеличивается. Это объясняется тем, что с повышением температуры расстояние между молекулами в жидких телах увеличивается, и соответственно равнодействующая межмолекулярных сил (и, следовательно, поверхностное натяжение) уменьшается. С помощью температурного коэффициента можно определить поверхностное натяжение при любой температуре, если известно значение поверхностного натяжения при какой-то температуре, т. е.

$$\sigma_T = \sigma_0 + \left( \frac{d\sigma}{dT} \right) \Delta T, \quad (2.4)$$

где  $\Delta T = T_T - T_0$ .

Появление кривизны поверхности из-за стремления системы к минимуму поверхностной энергии ведет не только к изменению площади межфазной поверхности, но и к появлению избыточного давления внутри фаз. Взаимосвязь между избыточным внутренним