

Ю. Ю. Гавронская, В. Н. Пак

# КОЛЛОИДНАЯ ХИМИЯ

УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ  
ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом  
высшего образования в качестве учебника для студентов  
высших учебных заведений, обучающихся по естественнонаучным  
направлениям и специальностям*

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

Москва ■ Юрайт ■ 2017

УДК 541.18(075.8)

ББК 24.6я73

Г12

**Авторы:**

**Гавронская Юлия Юрьевна** — профессор, доктор педагогических наук, кандидат химических наук, профессор кафедры химического и экологического образования факультета химии Российского государственного педагогического университета имени А. И. Герцена;

**Пак Вячеслав Николаевич** — доктор химических наук, профессор кафедры неорганической химии факультета химии Российского государственного педагогического университета имени А. И. Герцена, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации.

**Рецензенты:**

**Балашев К. П.** — доктор химических наук, профессор кафедры неорганической химии факультета химии Российского государственного педагогического университета имени А. И. Герцена;

**Сашина Е. С.** — доктор химических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной химии Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

**Гавронская, Ю. Ю.**

Г12

Коллоидная химия : учебник и практикум для академического бакалавриата / Ю. Ю. Гавронская, В. Н. Пак. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 287 с. — Серия : Бакалавр. Академический курс.

ISBN 978-5-534-02502-6

Издание включает теоретические основы курса и практикум по коллоидной химии. Рассмотрены особенности коллоидного (дисперсного) состояния вещества, причины возникновения и особенности проявления поверхностных явлений, образование, устойчивость и методы изучения дисперсных систем, их место в природе, технике и повседневной жизни человека. Содержание структурировано по главам с нелнейным изложением учебного материала.

Учебник ориентирован на современные образовательные технологии и методики обучения, содействующие формированию общекультурных и профессиональных компетенций через обучение химии.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

*Для студентов академического и прикладного бакалавриата, специалитета, слушателей курсов повышения квалификации и программ профессиональной переподготовки.*

УДК 541.18(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 978-5-534-02502-6

© © Гавронская Ю. Ю., Пак В. Н., 2016

© ООО «Издательство Юрайт», 2017

## Оглавление

<b>Предисловие</b> .....	<b>9</b>
<b>Глава 1. Коллоидная химия — физическая химия поверхностных явлений и дисперсных систем</b> .....	<b>12</b>
1.1. Введение в физическую химию поверхностных явлений и дисперсных систем .....	13
1.1.1. Возникновение науки о поверхностных явлениях и дисперсных системах. Коллоидная химия. Коллоидные растворы .....	13
1.1.2. Коллоидное состояние вещества .....	15
1.1.3. Объекты изучения физической химии поверхностных явлений и дисперсных систем .....	19
1.2. Особые свойства границы раздела фаз .....	20
1.2.1. Поверхностная энергия .....	20
1.2.2. Удельная поверхностная энергия и поверхностное натяжение .....	21
1.3. Краткий обзор поверхностных явлений .....	22
1.4. Общая характеристика дисперсных систем .....	25
1.4.1. Классификация дисперсных систем по агрегатному состоянию фаз .....	25
1.4.2. Классификация дисперсных систем по взаимодействию между частицами .....	26
1.4.3. Классификация дисперсных систем по размерам дисперсной фазы .....	27
1.4.4. Классификация дисперсных систем по взаимодействию между дисперсной фазой и дисперсионной средой .....	30
1.5. Количественные характеристики дисперсных систем .....	31
1.5.1. Характерный размер .....	31
1.5.2. Дисперсность .....	33
1.5.3. Удельная поверхность .....	33
1.5.4. Полная избыточная поверхностная энергия системы .....	35
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i> .....	36
<i>Задания для самостоятельной работы</i> .....	36
<i>Список дополнительной литературы</i> .....	36
<b>Глава 2. Получение и образование дисперсных систем</b> .....	<b>38</b>
2.1. Способы образования дисперсных систем .....	39
2.2. Диспергирование .....	40
2.2.1. Механические методы диспергирования .....	40
2.2.2. Ультразвуковой метод .....	43
2.2.3. Электрораспыление .....	44

2.3. Конденсационные методы .....	46
2.3.1. Методы физической конденсации.....	46
2.3.2. Методы химической конденсации.....	47
2.4. Пептизация .....	50
2.5. Строение мицеллы лиофобного золя .....	52
<i>Вопросы и задания для самоконтроля.....</i>	<i>55</i>
<i>Задания для самостоятельной работы.....</i>	<i>55</i>
<i>Список дополнительной литературы.....</i>	<i>56</i>
<b>Глава 3. Оптические свойства дисперсных систем.....</b>	<b>57</b>
3.1. Взаимодействие дисперсной системы со светом.....	58
3.2. Рассеяние света. Опалесценция. Эффект Тиндаля .....	59
3.3. Уравнение Рэля. Интенсивность рассеяния света и окраска дисперсных систем.....	62
3.4. Поглощение света и окраска дисперсных систем.....	64
3.5. Оптические методы исследования дисперсных систем .....	65
3.5.1. Оптическая микроскопия .....	65
3.5.2. Ультрамикроскопия и нефелометрия .....	67
3.5.3. Электронная микроскопия.....	70
<i>Вопросы и задания для самоконтроля.....</i>	<i>73</i>
<i>Задания для самостоятельной работы.....</i>	<i>73</i>
<i>Список дополнительной литературы.....</i>	<i>73</i>
<b>Глава 4. Устойчивость и коагуляция дисперсных систем .....</b>	<b>75</b>
4.1. Устойчивость дисперсных систем .....	76
4.2. Теория устойчивости дисперсных систем ДЛФО.....	78
4.3. Двойной электрический слой.....	80
4.3.1. Образование двойного электрического слоя на границе раздела фаз...80	
4.3.2. Строение двойного электрического слоя. Электрокинетический потенциал.....	82
4.3.3. Влияние электролитов на строение двойного электрического слоя...85	
4.4. Коагуляция зольей электролитами .....	88
4.4.1. Коагулирующее действие ионов. Порог коагуляции.....	88
4.4.2. Коагуляция при воздействии одноименного иона.....	88
4.4.3. Коагуляция при воздействии неоднородного иона.....	89
4.4.4. Коагуляция электролитами, содержащими многозарядный ион. Правило Шульце — Гарди.....	90
4.4.5. Перезарядка золя. Явление «неправильных рядов» коагуляции .....	91
4.4.6. Выбор наиболее эффективного электролита для коагуляции.....	93
4.5. Защита коллоидных частиц .....	94
<i>Вопросы и задания для самоконтроля.....</i>	<i>95</i>
<i>Задания для самостоятельной работы.....</i>	<i>95</i>
<i>Список дополнительной литературы.....</i>	<i>96</i>
<b>Глава 5. Электрокинетические явления .....</b>	<b>97</b>
5.1. Общая характеристика электрокинетических явлений.....	98
5.1.1. Взаимосвязь между электрокинетическими явлениями.....	98
5.1.2. Уравнение Гельмгольца — Смолуховского. Электроосмотическая и электрофоретическая подвижность.....	101

5.2. Электрофорез. Определение $\zeta$ -потенциала методом электрофореза.....	105
5.3. Электроосмос .....	106
5.4. Потенциал течения.....	108
5.5. Потенциал оседания .....	112
5.6. Особенности течения жидкости в капиллярных системах. Поверхностная проводимость.....	114
<i>Вопросы и задания для самоконтроля.....</i>	115
<i>Задания для самостоятельной работы.....</i>	116
<i>Список дополнительной литературы.....</i>	116
<b>Глава 6. Адгезия и смачивание. Равновесие на искривленной границе раздела фаз .....</b>	<b>117</b>
6.1. Адгезия .....	118
6.1.1. Работа адгезии .....	118
6.1.2. Механизм процессов адгезии .....	121
6.1.3. Когезия .....	122
6.2. Жидкость на твердой поверхности.....	123
6.2.1. Смачивание и растекание .....	123
6.2.2. Краевой угол смачивания. Закон Юнга.....	124
6.2.3. Условия смачивания. Лиофильные и лиофобные поверхности.....	125
6.3. Особенности искривленной границы раздела фаз.....	128
6.3.1. Равновесие на искривленной поверхности .....	128
6.3.2. Капиллярное давление.....	130
6.4. Капиллярные явления .....	131
6.5. Уравнение Томсона (Кельвина).....	132
<i>Вопросы и задания для самоконтроля.....</i>	136
<i>Задания для самостоятельной работы.....</i>	136
<i>Список дополнительной литературы.....</i>	136
<b>Глава 7. Адсорбция и адсорбционные свойства дисперсных систем....</b>	<b>137</b>
7.1. Адсорбция.....	138
7.1.1. Основные определения. Количественное выражение адсорбции ....	138
7.1.2. Физическая адсорбция и хемосорбция .....	140
7.1.3. Изотерма адсорбции .....	141
7.1.4. Теплота адсорбции .....	143
7.2. Фундаментальное уравнение адсорбции Гиббса.....	144
7.3. Адсорбция поверхностно-активных веществ на границе раздела «жидкость — газ» .....	146
7.3.1. Поверхностная активность. Поверхностно-активные и поверхностно-инактивные вещества.....	146
7.3.2. Строение адсорбционного слоя поверхностно-активных веществ ..	149
7.3.3. Вычисление параметров адсорбционного слоя поверхностно- активных веществ .....	151
7.4. Адсорбция на твердой поверхности .....	153
7.4.1. Особенности адсорбции на поверхности твердого тела.....	153
7.4.2. Математическое описание изотермы адсорбции. Теория и уравнение Ленгмюра.....	154
7.4.3. Теория полимолекулярной адсорбции. Уравнение Брунауэра — Эммета — Теллера.....	159

7.5. Адсорбция на пористых адсорбентах.....	163
7.5.1. Особенности адсорбции на пористых адсорбентах .....	163
7.5.2. Потенциальная теория адсорбции Поляни .....	164
7.5.3. Теория объемного заполнения микропор .....	166
7.5.4. Капиллярная конденсация .....	168
<i>Вопросы и задания для самоконтроля.....</i>	<i>172</i>
<i>Задания для самостоятельной работы.....</i>	<i>173</i>
<i>Список дополнительной литературы.....</i>	<i>173</i>

## **Глава 8. Молекулярно-кинетические свойства дисперсных систем..... 175**

8.1. Молекулярно-кинетические (коллигативные) свойства свободнодисперсных систем.....	176
8.2. Осмотическое давление коллоидных растворов .....	177
8.3. Броуновское движение .....	179
8.3.1. Теоретическое описание броуновского движения. Уравнение Эйнштейна – Смолуховского.....	180
8.3.2. Экспериментальные подтверждения количественной теории броуновского движения. Определение постоянной Авогадро .....	183
8.4. Седиментация .....	184
8.4.1. Седиментационная устойчивость .....	184
8.4.2. Скорость оседания частиц под действием силы тяжести.....	186
8.4.3. Седиментационно-диффузионное равновесие .....	187
8.5. Седиментационный анализ .....	190
8.5.1. Седиментационный анализ в гравитационном поле.....	190
8.5.2. Седиментационный анализ в центробежном поле.....	191
8.5.3. Определение молекулярной массы белков методом ультрацентрифугирования.....	193
<i>Вопросы и задания для самоконтроля.....</i>	<i>194</i>
<i>Задания для самостоятельной работы.....</i>	<i>195</i>
<i>Список дополнительной литературы.....</i>	<i>195</i>

## **Глава 9. Лиофильные и структурированные системы ..... 196**

9.1. Лиофильные дисперсные системы. Общая характеристика .....	197
9.2. Растворы высокомолекулярных соединений .....	199
9.2.1. Коллоидная химия высокомолекулярных соединений .....	199
9.2.2. Особенности строения молекул высокомолекулярных соединений.....	201
9.2.3. Растворение высокомолекулярных соединений .....	203
9.2.4. Вязкость растворов высокомолекулярных соединений .....	207
9.2.5. Высокомолекулярные соединения как полиэлектролиты. Изоэлектрическая точка.....	210
9.3. Поверхностно-активные вещества .....	212
9.3.1. Общая характеристика поверхностно-активных веществ .....	212
9.3.2. Мицеллообразование в растворах коллоидных поверхностно- активных веществ .....	215
9.3.3. Гидрофильно-липофильный баланс .....	218
9.3.4. Моющее действие поверхностно-активных веществ .....	219

9.4. Структурированные системы .....	221
9.4.1. Образование гелей и студней .....	221
9.4.2. Свойства гелей и студней .....	222
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i> .....	225
<i>Задания для самостоятельной работы</i> .....	226
<i>Список дополнительной литературы</i> .....	226
<b>Практикум .....</b>	<b>228</b>
П.1. Дисперсные системы. Количественные характеристики дисперсных систем .....	228
П.2. Строение мицеллы лиофобного золя. Способы получения зольей .....	232
П.3. Устойчивость и коагуляция зольей .....	235
П.4. Электрокинетические явления .....	237
П.5. Адгезия и смачивание. Равновесие на искривленной границе раздела фаз .....	240
П.6. Адсорбция и адсорбционные свойства дисперсных систем .....	243
П.7. Молекулярно-кинетические свойства дисперсных систем .....	245
П.8. Седиментационная устойчивость дисперсных систем .....	248
<b>Лабораторные работы .....</b>	<b>251</b>
Л.1. Получение и свойства дисперсных систем .....	251
Л.2. Определение порогов коагуляции зольей электролитами .....	257
Л.3. Определение электрокинетического потенциала методом электрофореза .....	261
Л.4. Изучение адсорбции уксусной кислоты на поверхности активированного угля .....	264
Л.5. Изучение адсорбции алифатического спирта на границе «раствор – воздух» .....	267
Л.6. Седиментационный анализ суспензии .....	271
Л.7. Определение молекулярной массы ВМС по вязкости растворов .....	278
Л.8. Определение изоэлектрической точки ВМС .....	280
Л.9. Изучение критической концентрации мицеллообразования ПАВ .....	283
<b>Заключение .....</b>	<b>286</b>
<b>Литература .....</b>	<b>287</b>





## Предисловие

Коллоидная химия как самостоятельная дисциплина или как большой и значимый раздел дисциплины «Физическая химия» входит в образовательные программы по большинству естественнонаучных направлений высшего образования.

Издание составлено в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом (ФГОС) высшего образования и адресовано студентам академического и прикладного бакалавриата, специалитета, слушателям курсов повышения квалификации и программ профессиональной переподготовки. Оно ориентировано на методическую поддержку лекционных, практических занятий и внеаудиторной работы студентов, может быть полезно преподавателям системы высшего и среднего профессионального образования и учителям.

Издание «Коллоидная химия» представляет собой современную учебную книгу, содержащую теоретические основы курса, практические примеры и практикум.

Учебный материал отобран в соответствии с программами учебных дисциплин «Коллоидная химия» и «Физическая химия» (раздел «Физическая химия поверхностных явлений и дисперсных систем»).

Успешное освоение содержания курса коллоидной химии основано на использовании и развитии базисных физико-химических знаний (химической термодинамики, теории растворов, электрохимии, кинетики), умений в планировании проведения физико-химического эксперимента, навыков математической обработки результатов, интерпретации и анализа данных. Интенсивное развитие современной теоретической физической химии поверхностных явлений и дисперсных систем и ее прикладных аспектов потребует привлечения дополнительных источников актуальной информации и навыков работы с ними.

Поскольку коллоидную химию часто называют химией и физикой реальных тел, важным условием достижения результата обучения будет привлечение студентом собственного бытового и практикоориентированного образовательного опыта в области физики, биологии, экологии, химической технологии и других естественнонаучных дисциплин.

Учебник принципиально отличается от имеющихся прототипов гармоничным сочетанием необходимого объема и научного уровня основного материала, отражающего современную химию поверхностных явлений и дисперсных систем, с неформальным и продуктивным использованием ряда методико-педагогических приемов, способствующих развитию интереса к дисциплине, самостоятельности и творческой вовлеченности студентов в ее изучение. В соответствии с современным Федеральным

государственным образовательным стандартом учебник ориентирован на современные образовательные технологии и методики обучения, содействующие формированию общекультурных и профессиональных компетенций через обучение химии.

Учебник структурирован по главам с нелинейным изложением учебного материала. Для удобства навигации по тексту все элементы содержания имеют многоуровневую нумерацию.

Более 100 рисунков, помещенных в учебнике, помогают визуализировать понимание мира поверхностных явлений и дисперсных систем. Каждая глава помимо четко и обоснованно изложенного основного коллоидно-химического содержания включает следующие дидактические элементы:

1) ожидаемые результаты обучения в виде перечня формируемых компетенций, суммирующих, что именно будет знать, уметь студент, какой опыт он приобретет;

2) ориентация в главе — что именно студенты узнают, поймут и научатся делать (в отличие от п. 1 — в менее формальном описании);

3) предварительные требования для успешного изучения учебного материала главы — какие основные знания и умения потребуются для успешного овладения материалом;

4) интерактивные компоненты, которые предназначены для создания учебных ситуаций, где акцент переносится с овладения готовым знанием на его выработку. Современная образовательная ситуация требует внедрения в учебный процесс новых прогрессивных методов и форм обучения, основанных на продуктивном, интерактивном взаимодействии учащегося с образовательной средой. При изучении дисциплин точных наук, к которым относится коллоидная химия, достаточно сложно использовать те методы и приемы, которые изначально разрабатывались для учебных ситуаций и в которых несколько ответов на познавательный вопрос могут соперничать по степени истинности. Специально подобранный учебный материал и творческое отношение к учебной и преподавательской деятельности позволяют использовать методы обучения, направленные не только на получение знаний, но и на ориентацию в их проблемном поле, развитие системы ценностей, профессиональных позиций, своеобразного профессионального мироощущения студентов;

5) «кнопки перемотки» — ссылки на другие главы или параграфы (являются аналогами перекрестных электронных гиперссылок), обращение к которым поможет студенту легче ориентироваться в учебном материале, а также понять связи между разделами коллоидной химии;

6) тематические вставки («Исторический экскурс», «Мнение специалиста», «Вопросы практики»), которые содержат дополнительную информацию, связанную с историей науки, практическим использованием, особенностями отдельных поверхностных явлений или дисперсных систем, иллюстрируя их место и важность не только для химической науки, но и для понимания широкого круга явлений в быту, в природе, в деятельности людей различных профессий;

7) примеры, являющиеся своеобразным мостиком, связывающим теорию с практикой. Именно приложение теоретических знаний к решению

конкретных проблем наиболее часто вызывает у студентов затруднения. В примерах разбираются способы решения типичных количественных задач, поясняется применимость некоторых уравнений, оцениваются величины ответов. Примеры не только иллюстрируют учебный материал, но и развивают способность студента рассуждать с позиции химической науки. С рассуждениями и вычислениями, подобными приведенным в примерах, студенты будут встречаться в различных контекстах при дальнейшем изучении химии и в собственных химических исследованиях;

8) вопросы для самоконтроля, которые дают студентам возможность проверить понимание теоретического материала или готовность к его применению, решению определенного типа задач или проведению вычислений;

9) списки основной и дополнительной литературы, включающие не только учебные, но и научные издания, статьи в научных и образовательных журналах, электронные ресурсы;

10) задания для самостоятельной работы, которые в значительной мере ориентированы на подготовку к будущей профессиональной деятельности. Задания связаны как с внеаудиторным изучением рекомендованной учебной литературы по коллоидной химии, так и с самостоятельным поиском информации и фактов;

11) полезный и приятный бонус для студентов — каждый параграф или подпараграф заканчивается кратким резюме, что особенно востребовано при подготовке к зачету и экзамену.

В результате успешного освоения курса коллоидной химии студент должен:

**знать**

- виды и характеристики дисперсных систем;
- физико-химические свойства дисперсных систем;
- теоретические основы и модели поверхностных явлений;

**уметь**

- давать качественную и количественную характеристику дисперсных систем;
- качественно и количественно описывать свойства дисперсных систем;
- качественно и количественно описывать поверхностные явления;

**владеть**

- понятийно-терминологическим аппаратом в области коллоидной химии;
- навыками изучения дисперсных систем и поверхностных явлений;
- способами описания и классификации дисперсных систем;
- способами описания поверхностных явлений.

Надеемся, что в процессе изучения коллоидной химии студент проникнется словами Д. И. Менделеева: «Вопросы коллоидной химии должно считать передовыми и могущими иметь значение во всей физике и химии»<sup>1</sup> и что работа над курсом расширит научный кругозор студентов и обогатит их новыми естественнонаучными знаниями.

---

<sup>1</sup> Менделеев Д. И. Основы химии. СПб., 1871.

# Глава 1

## КОЛЛОИДНАЯ ХИМИЯ – ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ И ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

---

После изучения главы 1 студент должен:

### **знать**

- объекты изучения коллоидной химии;
- особенности коллоидного состояния вещества;
- роль Т. Грэма, И. Г. Борщова, П. П. Веймарна в становлении и развитии представлений о коллоидном состоянии вещества;
- причины особых свойств границы раздела фаз и возникновения поверхностных явлений;
- признаки дисперсных систем;
- основания для классификации дисперсных систем;
- важнейшие количественные характеристики дисперсных систем;

### **уметь**

- различать поверхностные явления, вызванные стремлением системы к уменьшению удельной поверхностной энергии;
- на качественном уровне описывать основные поверхностные явления;
- приводить примеры дисперсных систем с различным агрегатным состоянием, дисперсной фазы и дисперсионной среды, связно- и свободнодисперсных систем, лиофильных и лиофобных, высоко-, средне- и грубодисперсных систем;
- выделять характерные размеры дисперсных систем;
- вычислять дисперсность, удельную поверхность и избыточную поверхностную энергию систем с известными характерными размерами;

### **владеть**

- специальной терминологией коллоидной химии;
- навыками выделения классификационных признаков дисперсных систем по различным основаниям классификации;
- способами количественного описания дисперсных систем.

*Изучив эту главу, вы:*

- узнаете, почему физическую химию поверхностных явлений и дисперсных систем называют коллоидной химией, что изучает этот раздел химии и что такое коллоидное состояние вещества;
- познакомитесь с разнообразием дисперсных систем и особенностями границы раздела фаз;
- проследите возрастание роли поверхностных явлений с ростом дисперсности;
- научитесь описывать дисперсные системы и вычислять дисперсность и удельную поверхность.

*Знания и умения, которые необходимы для освоения этой главы*

Мы предполагаем, что читатель:

- знаком с понятиями: раствор, фаза, гомогенная система, гетерогенная система, диффузия, осмос, энергия Гиббса, поверхностное натяжение;

- знает объединенное уравнение первого и второго начал термодинамики и понимает смысл входящих в него величин;
- умеет вычислять площадь поверхности и объем простейших тел — куба, шара, цилиндра.

Если вы не уверены в достаточном знании этих вопросов, советуем обратиться к соответствующим учебным пособиям по физической химии и математике.

---

## 1.1. Введение в физическую химию поверхностных явлений и дисперсных систем

### 1.1.1. Возникновение науки о поверхностных явлениях и дисперсных системах. Коллоидная химия. Коллоидные растворы

Современная физическая химия поверхностных явлений и дисперсных систем как самостоятельный раздел науки выросла из коллоидной химии, и эти названия часто используют как синонимы. Саму коллоидную химию определяют как науку о дисперсных системах и поверхностных явлениях. Причина некоторого несоответствия названия и содержания кроется в истории возникновения дисциплины.

Своим названием коллоидная химия обязана шотландскому химику Томасу Грэму, который в 1860-х гг. использовал термин «коллоид» (от греч. *kolla* — клей) при описании клееподобных «псевдорастворов» крахмала, желатина, альбумина, на необычные свойства которых и ранее обращали внимание.

#### Исторический экскурс

Т. Грэм закономерно считается основоположником коллоидной химии, однако он известен и другими научными достижениями. Так, исследуя разные формы фосфорной кислоты, он ввел в химию представление о многоосновных кислотах. Также он обнаружил существование кристаллизационной воды во многих соединениях, установил, что скорость диффузии в газах обратно пропорциональна квадратному корню из его плотности (закон Грэма). Распространив методы исследования диффузии газов через пористые перегородки на жидкости, Грэм подробно описал явление осмоса.

---

В многочисленных опытах с самыми разными растворами внимание Грэма привлекли вещества особого типа, которые он назвал *коллоидами*, а обладающие особыми свойствами растворы этих веществ — *коллоидными растворами*.

Оказалось, что растворенные в воде коллоиды не проходят через тонкопористую мембрану из пергамента, в отличие от растворов, например, соли или сахара. Эта особенность была положена в основу диализа (от греч. *dialysis* — отделение) — способа очистки коллоидного раствора от примесей. Прибор для проведения диализа (диализатор) представляет собой разделенный мембраной сосуд, в одной части которого находится подвергаемый очистке коллоидный раствор, а в другой — растворитель. При последовательной смене растворителя можно практически полностью удалить из коллоидного раствора низкомолекулярные вещества.

Явление диализа лежит в основе гемодиализа — метода очистки крови в аппаратах «искусственная почка». В таких аппаратах через специальную мембрану кровь очищается от токсинов и продуктов распада — электролитов, мочевины, мочевой кислоты. Мембраны для гемодиализа изготавливают из полиамида, полиарилетерсульфона, поливинилпирролидона, купрофана и других современных материалов.

Теперь нет сомнений, что способность проходить через поры мембраны определяется размером частиц, но Грэм полагал, что было более глубокое различие между обычными, как правило, кристаллизующимися при упаривании раствора веществами и коллоидами, которые не удавалось выделить в виде кристаллов. По способности диффундировать через мембрану и образовывать кристаллы все вещества были разделены им на два класса — *коллоиды и кристаллоиды*.

Вскоре, однако, было показано, что одно и то же вещество в зависимости от условий может обладать свойствами коллоида или кристаллоида. Например, при растворении NaCl в воде образуется истинный раствор (NaCl — «кристаллоид»), а при растворении NaCl в бензоле — коллоидный раствор (NaCl — «коллоид»); канифоль в спирте образует истинный раствор, а в воде — коллоидный.

Напомним, что под истинным раствором понимают гомогенную систему, состоящую из растворителя и растворенного вещества, причем растворенное вещество представлено в виде отдельных молекул, ионов или атомов. Подавляющее большинство растворов, с которыми вы встречаетесь при изучении химии, — истинные.

Кроме способности к диализу были отмечены еще некоторые *особенности коллоидных растворов* по сравнению с истинными растворами:

- низкая скорость диффузии;
- практически не определяемое осмотическое давление;
- рассеяние света (опалесценция);
- образование осадка при добавлении небольших количеств солей, не взаимодействующих с растворенным веществом (коагуляция);
- способность к передвижению коллоидных частиц в электрическом поле (электрофорез).

## Интерактивный компонент

*Какую информацию о коллоидных частицах можно получить, проанализировав свойства коллоидных растворов?*

Интерпретация свойств представлена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

### Обсуждение свойств коллоидных частиц

Свойства	Интерпретация	
Способность к диализу	Коллоидные частицы не проходят в поры мембраны, в отличие от обычных малых молекул	Коллоидные частицы крупнее обычных молекул
Низкая скорость диффузии	Коэффициент диффузии обратно пропорционален радиусу частицы	

Свойства	Интерпретация	
Практически не определяемое осмотическое давление	Осмотическое давление пропорционально молярной концентрации. Реальная концентрация коллоидных частиц значительно меньше формальной концентрации растворенного вещества	Коллоидные частицы представляют собой ассоциаты из большого числа малых молекул
Рассеяние света	Рассеяние света происходит, если размер частиц в среде меньше длины световой волны или соизмерим с ней. Длина волны видимого света 400–750 нм	Размер частиц в коллоидных растворах меньше длины световой волны или соизмерим с ней
Коагуляция	Выпадение осадка при добавлении веществ, не взаимодействующих с растворенным веществом, вызвано не химическими, а физическими изменениями	Частицы имеют тенденцию к укрупнению. Коллоидные системы термодинамически неустойчивы
Передвижение частиц в электрическом поле	В электрическом поле передвигаются заряженные частицы. Коллоидный раствор в целом электронейтрален	Коллоидная частица может приобрести заряд в результате взаимодействия с растворителем

## Резюме

*Частицы в дисперсных системах (коллоидных растворах) имеют размер 1–1000 нм, склонны к укрупнению, могут иметь электрический заряд.*

### 1.1.2. Коллоидное состояние вещества

Исследуя свойства и строение «коллоидных веществ, участвующих в образовании растительных и животных организмов», современник Т. Грэма русский ботаник и химик, профессор Киевского университета И. Г. Борщов опроверг деление веществ на коллоиды и кристаллоиды, указав, что коллоидные частицы являются «большими сложными молекулами» особой кристаллической структуры, состоящими из кристаллов очень незначительной величины («Журнал русского химического общества», 1869).

◀ О предложении Т. Грэма разделить все вещества на коллоиды и кристаллоиды см. в подпараграфе 1.1.1.

Борщов утверждал, что *возможно существование одного и того же вещества в кристаллической и коллоидной формах.*

Поскольку одно и то же вещество может обладать свойствами как коллоида, так и кристаллоида, в зависимости от растворителя образуя или истинный, или коллоидный раствор, понятие о коллоидах как об особом классе химических веществ сменилось представлением о *коллоидном состоянии вещества*, впервые сформулированным профессором Петербургского горного института П. П. фон Веймарном.

Многочисленными экспериментами Веймарн подтвердил и развил исследования Борщова, показав, что при определенных условиях каждое вещество может находиться в коллоидном состоянии и о коллоидах можно говорить как о твердых, жидких, газообразных, растворимых и нерастворимых веществах.

На первый план Веймарн выдвигал понятие *дисперсного состояния вещества*, предлагая вообще отказаться от термина «коллоид» и заменить его на понятие «дисперсоид», а коллоидную химию называть дисперсоидологией.

Изучение свойств коллоидных растворов разнообразных веществ позволило установить фундаментальный принцип универсальности коллоидного (дисперсного) состояния вещества.

### Исторический экскурс

За исследование «Коллоидное состояние как общее свойство материи» (1911) П. П. фон Веймарн получил от Русского физико-химического общества премию имени академика Н. Н. Бекетова.

Традиционно в естествознании сначала рассматривается вещество (однокомпонентная система) в твердом, жидком или газообразном состоянии, представляющее собой отдельную фазу, затем рассматриваются фазовые переходы, затем растворы — многокомпонентные гомогенные системы, в которых одно вещество распределено в другом на уровне отдельных молекул. С появлением коллоидной химии стало очевидным наличие «промежуточного» состояния вещества между его состоянием в объеме фазы и в растворе — а именно коллоидного, или дисперсного, состояния (рис. 1.1).

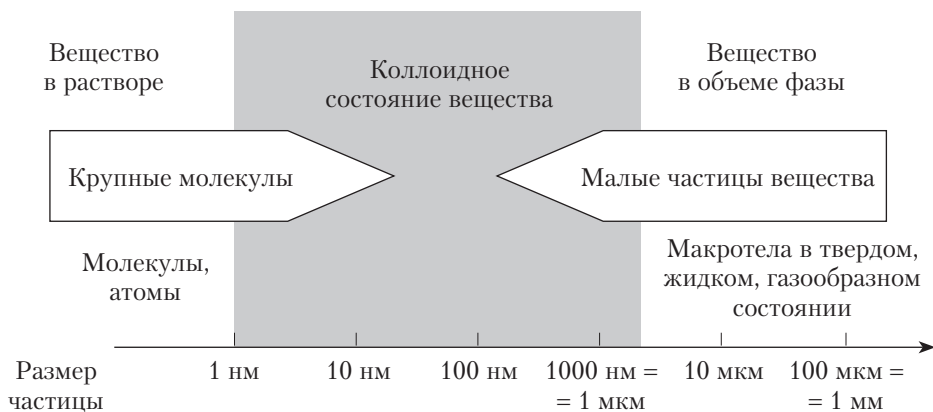


Рис. 1.1. Коллоидное состояние вещества — промежуточное между состоянием в растворе и в объеме фазы

Коллоидное состояние вещества характерно для частиц малых размеров в коллоидных растворах (золях), аэрозолях, капелек в эмульсиях, тонких пленок, волокон, капилляров, т.е. для *дисперсных систем*.

►► Дисперсные системы и их виды обсуждаются в параграфе 1.4.

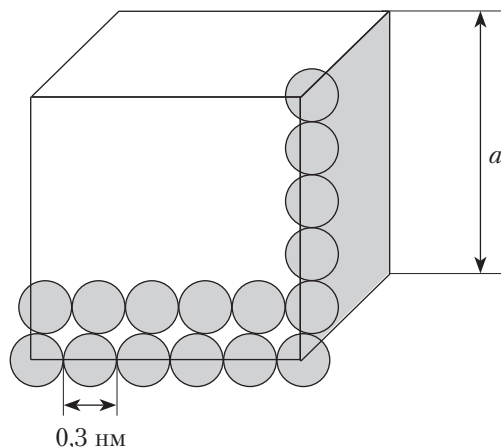


В дисперсных системах вещество так или иначе раздроблено до некоторых очень малых размеров, сохраняя при этом свойства фазы.

### Интерактивный компонент

*До какого предела можно измельчить вещество так, чтобы оно сохраняло свойства фазы?*

Для сохранения фазовых свойств необходимо, чтобы молекулы вещества существовали не только на поверхности, но и в объеме фазы. В качестве модели рассмотрим частицу вещества, имеющую форму куба с длиной ребра  $a$  (рис. 1.2). Предположим, что расстояние между центрами молекул составляет 0,3 нм (для сравнения — размер молекулы воды 0,28 нм).



**Рис. 1.2. Модель коллоидной частицы при определении предела измельчения вещества**

Проследим, как по мере уменьшения размера кубической частицы изменяется доля молекул, принадлежащих границе раздела фаз. Для этого нужно оценить общее число молекул в частице и число молекул на ее поверхности. При вычислении числа молекул на поверхности обратите внимание на то, чтобы молекулы на 12 ребрах и 8 вершинах куба были учтены только один раз. Суть оценочных расчетов ясна из данных табл. 1.2.

*Таблица 1.2*

#### Вычисление доли молекул, принадлежащих границе раздела фаз

Размер частицы $a$ , м	Число молекул по ребру $n = a / (3 \cdot 10^{-10})$	Общее число молекул в частице $n_{\text{общ}} = n^3$	Число молекул на поверхности $n_S = 6n^2 - 12n + 8$	Доля поверхностных молекул $(n_S / n_{\text{общ}}) \times 100\%$
$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6} / 3 \cdot 10^{-10} = 10^4$	$10^{12}$	$\approx 6 \cdot 10^8$	0,06
$3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7} / 3 \cdot 10^{-10} = 10^3$	$10^9$	$\approx 6 \cdot 10^6$	0,6
$10^{-7}$	$10^{-7} / 3 \cdot 10^{-10} \approx 3,3 \cdot 10^2$	$3,6 \cdot 10^7$	$\approx 6,6 \cdot 10^5$	1,8

Размер частицы $a$ , м	Число молекул по ребру $n = a/(3 \cdot 10^{-10})$	Общее число молекул в частице $n_{\text{общ}} = n^3$	Число молекул на поверхности $n_s = 6n^2 - 12n + 8$	Доля поверхностных молекул $(n_s/n_{\text{общ}}) \times 100\%$
$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}/3 \cdot 10^{-10} = 10^2$	$10^6$	$\approx 5,8 \cdot 10^4$	6
$10^{-8}$	$10^{-8}/3 \cdot 10^{-10} \approx 33$	$3,6 \cdot 10^4$	6146	17
$3 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-9}/3 \cdot 10^{-10} = 10$	1000	488	48
$10^{-9}$	$10^{-9}/3 \cdot 10^{-10} \approx 3$	27	26	96

Таким образом, в частицах размером 10 нм ( $10^{-8}$  м) около 17% молекул находятся на границе раздела фаз, тогда как в частицах размером 1 нм практически все молекулы принадлежат поверхности, дальнейшего измельчения дисперсной фазы ведет к исчезновению границы раздела фаз.

Приведенные расчеты являются ориентировочными, однако *эта простая модель позволяет сделать вывод о минимальном размере коллоидных частиц (1 нм), когда почти все молекулы вещества принадлежат поверхности.*

### На передовой линии науки

Представления о коллоидном состоянии вещества закладывают основы *нанохимии* — науки о материалах будущего. Термины «наночастицы» и «наносистемы» стали использовать для обозначения частиц наноразмеров — от 1 до 100 нм — после введения системы единиц СИ, т.е. намного позже, чем появились термины «коллоидные частицы» и «коллоидные системы». В современной химии стали возможными методы синтеза, с помощью которых система может быть «нарезана» на частички, имеющие размеры в области нанометров. Это дает возможность изготавливать высокоэффективные катализаторы или, например, нанокapsулы для целенаправленной доставки лекарственных препаратов непосредственно к очагу заболевания.

Измельчение вещества приводит к увеличению площади поверхности, поэтому в высокодисперсных системах, в том числе в коллоидных растворах, *значительная часть вещества (до 50%) принадлежит поверхности.* Молекулы на поверхности обладают *избытком энергии* по сравнению с молекулами в объеме фаз, что придает веществу в поверхностных слоях специфические свойства и приводит к *возникновению поверхностных явлений.* Вещества в поверхностных слоях обладают измененными физическими и химическими свойствами по сравнению с объемными фазами.

►► О поверхностной энергии и поверхностных явлениях см. в параграфах 1.2, 1.3 и подробнее в гл. 4–7.

Повторим, что в гетерогенной дисперсной (коллоидной) системе велика доля вещества *в поверхностном состоянии.* В результате вклад поверхностных свойств в общие свойства реального тела может оказаться столь значи-

тельным, что приведет к появлению нового качества. Наглядным примером этого может служить образование тумана или облаков из воды. Поверхностное состояние вещества характерно не только для дисперсных систем, но и для любых реальных тел, имеющих поверхность, оно универсально.

### **Резюме**

*Коллоидное состояние вещества — состояние, характеризующее особыми свойствами вещества на границе раздела фаз. Сегодня чаще говорят не о коллоидном, а о дисперсном или поверхностном состоянии вещества.*

### **1.1.3. Объекты изучения физической химии поверхностных явлений и дисперсных систем**

Выделим два важнейших признака объектов изучения физической химии поверхностных явлений и дисперсных систем (современной коллоидной химии) — *гетерогенность* и *дисперсность*.

Гетерогенность, т.е. наличие двух или более фаз, определяет существование в системе границы раздела, обладающей избыточной по сравнению с объемом энергией, и, как следствие, проявление особых свойств и явлений на поверхности.

►► Об особых свойствах границы раздела фаз и избыточной поверхностной энергии см. в параграфе 1.2.

Дисперсность (от лат. *dispersus* — рассеянный, рассыпанный) как мера раздробленности фазы определяет величину поверхности и вклад поверхностных свойств в общие свойства системы.

Золи, порошки, суспензии, аэрозоли, эмульсии, волокнистые, слоистые, пористые материалы представляют собой *дисперсные гетерогенные системы* — наиболее типичные объекты современной коллоидной химии, поскольку в них проявляется все многообразие поверхностных явлений, формирующих важнейшие свойства реальных тел.

С ростом дисперсности в них увеличивается доля молекул, принадлежащих поверхности, и, соответственно, доля вещества в коллоидном состоянии. В дисперсных системах с очень большой по сравнению с макрообъектами площадью поверхности раздела фаз поверхностная энергия столь велика, что порождает новые свойства и качества, которые характерны лишь для дисперсных систем.

Избыток поверхностной энергии существует на любой межфазовой поверхности. Если рассматриваются свойства *поверхности*, то объектом коллоидной химии может быть любое тело независимо от размера. И с этой точки зрения название «физическая химия поверхностных явлений и дисперсных систем» более точно отвечает объектам изучения, чем «коллоидная химия».

◄◄ О коллоидном состоянии вещества см. в подпараграфе 1.1.2.

Растворы высокомолекулярных соединений занимают особое место. Коллоидные растворы ВМС, многие из которых изучал Т. Грэм в эпоху зарождения коллоидной химии, обладают высокой дисперсностью (размер

макромолекул  $10^{-9}$ — $10^{-7}$  м) и проявляют многие свойства коллоидных растворов, но состояние вещества в виде отдельных молекул не позволяет выделить поверхность раздела фаз. В связи с отсутствием признака гетерогенности в 1930-х гг. растворы высокомолекулярных соединений (ВМС) были исключены из объектов коллоидной химии. Тем не менее свойства растворов ВМС рассматриваются как составная часть физической химии поверхностных явлений и дисперсных систем.

►► О свойствах растворов ВМС пойдет речь в гл. 9.

Также уникальными свойствами обладают поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые могут образовывать и истинные, и коллоидные растворы, а также находиться на поверхности раздела фаз в виде адсорбционного слоя.

►► О состоянии ПАВ в адсорбционном слое см. в параграфе 7.3, о коллоидных ПАВ — в параграфе 9.5.

## Резюме

*Основными объектами изучения современной коллоидной химии являются дисперсные гетерогенные системы, поверхностные слои на границе раздела фаз независимо от их протяженности, высокомолекулярные соединения и поверхностно-активные вещества.*

## 1.2. Особые свойства границы раздела фаз

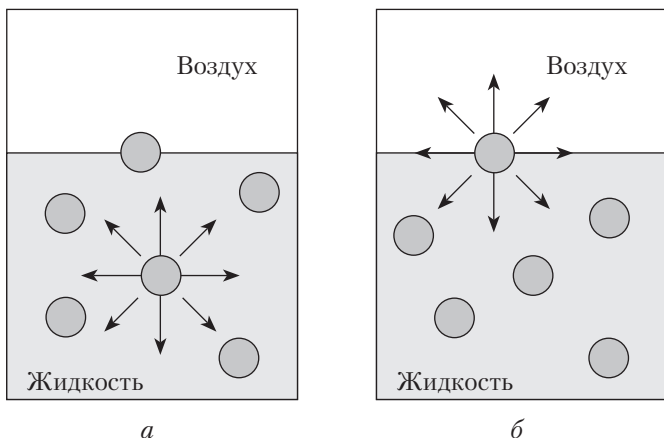
### 1.2.1. Поверхностная энергия

Поверхность границы раздела фаз обладает особыми свойствами по сравнению с объемами фаз.

В объеме фазы силы взаимного притяжения, действующие на молекулу со стороны соседних молекул, скомпенсированы во всех направлениях, их равнодействующая равна нулю (рис. 1.3, а). Молекула находится в состоянии энергетического равновесия.

На границе раздела фаз, например на поверхности жидкости, молекула испытывает неодинаковое притяжение со стороны каждой из фаз. На границе «жидкость — воздух» притяжение будет сильнее со стороны жидкости, и молекула будет «втягиваться» внутрь жидкости (рис. 1.3, б). В любом случае силы, действующие на молекулу, находящуюся на границе раздела фаз, не уравновешены. Равнодействующая сил притяжения перпендикулярна границе раздела фаз и, как правило, направлена в сторону более полярной фазы.

Таким образом, молекула на границе раздела фаз обладает избытком энергии (положительным или отрицательным) по сравнению с молекулой в объеме; следовательно, вся поверхность раздела фаз обладает *избытком энергии по сравнению с объемом фазы*. Поэтому поверхностную энергию часто называют *избыточной*.



**Рис. 1.3. Образование избыточной поверхностной энергии:**  
*a* — молекула в объеме; *б* — молекула на границе фаз

Поверхностная энергия — результат нескомпенсированности сил межмолекулярного взаимодействия в соседних фазах.

Полную избыточную поверхностную энергию всей дисперсной системы  $G$  можно выразить через удельную поверхностную энергию  $\sigma$  и площадь границы раздела фаз  $S$ :

$$G = \sigma S,$$

размерность:  $[\text{Дж}] = [\text{Дж}/\text{м}^2] \cdot [\text{м}^2]$ .

►► Об удельной поверхностной энергии, о поверхностном натяжении и об их соотношении см. в подпараграфе 1.2.2.

Из этого уравнения следует, что избыток поверхностной энергии в системе может быть снижен двумя путями — за счет снижения  $\sigma$  или за счет уменьшения  $S$ .

►► О путях снижения избыточной поверхностной энергии см. в параграфе 1.3.

### Резюме

*Поверхностная энергия — результат нескомпенсированности сил межмолекулярного взаимодействия в соседних фазах гетерогенной системы.*

### 1.2.2. Удельная поверхностная энергия и поверхностное натяжение

Поверхностную энергию в расчете на единицу площади поверхности называют *удельной поверхностной энергией*. Удельная поверхностная энергия  $\sigma$   $[\text{Дж}/\text{м}^2]$  — фактор интенсивности поверхностной энергии.

◄◄ О поверхностной энергии см. в подпараграфе 1.2.1.

На практике понятие «удельная поверхностная энергия» часто заменяют понятием «поверхностное натяжение», используя их как эквивалентные.

Понятие «поверхностное натяжение» возникло в естествознании раньше, чем развилась термодинамика поверхностных явлений. Поверхностное натяжение  $\sigma$  [Н/м] рассматривается как стягивающая жидкость сила, направленная по касательной к поверхности (тангенциально), рассчитанная на единицу длины периметра. Для границы раздела «жидкость — воздух» эту величину традиционно называют поверхностным натяжением, для границы раздела «жидкость — жидкость» — пограничным натяжением, для границы двух конденсированных фаз — межфазным натяжением.

Возникновение избыточной поверхностной энергии и стягивающей силы объясняется в обеих трактовках (энергетической и силовой) одной и той же причиной — нескомпенсированностью межмолекулярного взаимодействия на границе раздела фаз: поверхностные молекулы, обладая избыточной энергией, стремятся уйти внутрь конденсированной фазы, тем самым сокращая поверхность.

Значения  $\sigma$  в энергетическом и силовом выражениях совпадают для индивидуальных веществ и близки для многокомпонентных систем. Размерности этих величин:

$$\begin{array}{l} \text{Удельная} \\ \text{поверхностная} \\ \text{энергия} \end{array} \quad \sigma = \frac{\text{энергия}}{\text{площадь}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{м}} = \frac{\text{сила}}{\text{длина}} = \sigma \quad \begin{array}{l} \text{Поверх-} \\ \text{ностное} \\ \text{натяжение} \end{array}$$

### Резюме

*Удельная поверхностная энергия (поверхностное натяжение) — поверхностная энергия в расчете на единицу площади поверхности.*

## 1.3. Краткий обзор поверхностных явлений

Наличие границы раздела фаз приводит к появлению в системе избыточной поверхностной энергии и, как следствие, термодинамической неустойчивости, что является причиной особых свойств поверхности и порождает ими поверхностных явлений.

Более устойчивым состоянием системы является состояние с меньшей энергией, поэтому дисперсная система будет стремиться к снижению поверхностной энергии.

◀◀ О поверхностной энергии см. в подпараграфе 1.2.1.

Повторим, что полная избыточная поверхностная энергия дисперсной системы  $G$  зависит от удельной поверхностной энергии  $\sigma$  и площади границы раздела фаз  $S$ :  $G = \sigma S$ .

Снижение полной избыточной поверхностной энергии  $G$  может быть реализовано двумя основными путями:

- 1) уменьшением поверхности раздела фаз;
- 2) уменьшением удельной поверхностной энергии  $\sigma$ .

В соответствии с этими путями все поверхностные явления в дисперсных системах можно разделить на две группы.

**Первая группа** — поверхностные явления как результат самопроизвольного *уменьшения поверхности раздела фаз  $S$*  (рис. 1.4):

- образование *сферической поверхности* частицы, так как по сравнению с частицами другой формы они обладают минимальной поверхностью. Капли жидкости самопроизвольно принимают форму сферы в отсутствие силы тяжести или в эмульсиях, если плотности жидкостей дисперсной фазы и дисперсионной среды одинаковы;

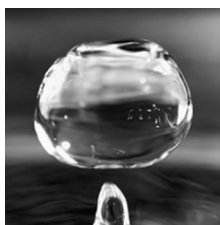
- образование идеально *гладкой поверхности* (на границе раздела «жидкость — газ»);

- самопроизвольное *укрупнение частиц* дисперсной фазы. Слипание мелких частиц твердой дисперсной фазы в более крупные называют *коагуляцией*. Слияние мелких капель или пузырьков в жидкой дисперсионной среде называют *коалесценцией*;

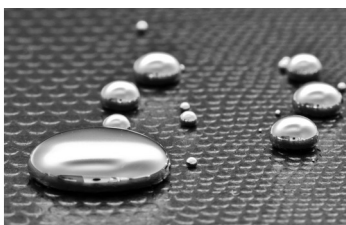
▶▶ Коагуляция обсуждается в гл. 4.

- изотермическая перегонка — принудительное испарение мелких капель или частиц с образованием более крупных. В отличие от коагуляции или коалесценции при изотермической перегонке укрупнение частиц происходит не механическим слипанием, а через испарение.

▶▶ Об изотермической перегонке см. в параграфе 6.5.



*a*



*б*

**Рис. 1.4. Поверхностные явления как результат самопроизвольного уменьшения поверхности раздела фаз:**

*a* — сферическая поверхность жидкости; *б* — образование идеально гладкой поверхности и слияние мелких капель жидкости

**Вторая группа** — поверхностные явления как результат *уменьшения удельной поверхностной энергии  $\sigma$*  в ходе процессов, протекающих на поверхности раздела фаз (рис. 1.5):

- изменение концентрации вещества на границе раздела фаз (*адсорбция*);

▶▶ Явлению адсорбции посвящена гл. 7.

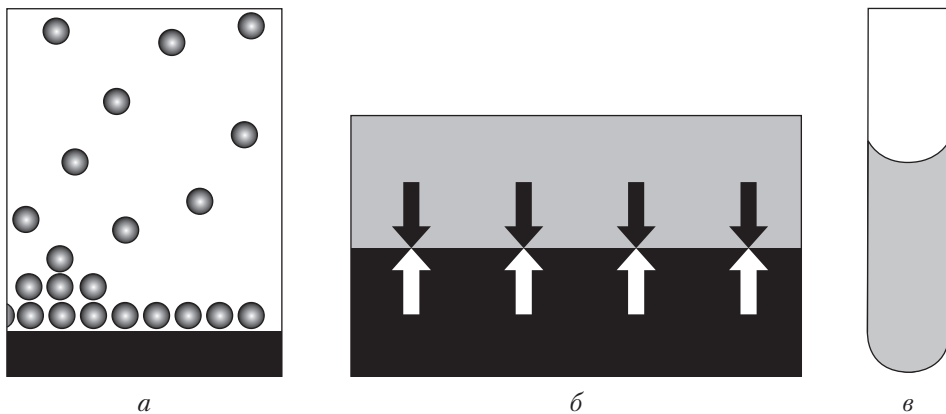
- определенная *ориентация полярных молекул, ионов* в поверхностном слое и, как результат, образование двойного электрического слоя и возникновение процессов, вызванных наличием электрического заряда (коагуляция зольей электролитами, электрокинетические явления);

▶▶ Электрокинетические явления описаны в гл. 5.

- межфазное взаимодействие между поверхностями фаз при их молекулярном контакте (*адгезия, смачивание*);
- изменение профиля жидкости у твердой поверхности — образование мениска (*капиллярные явления*);

►► Об адгезии, смачивании и капиллярных явлениях см. в гл. 6.

- *тепловые эффекты*, которые связаны с образованием новой поверхности раздела фаз или сопутствуют другим поверхностным явлениям.



**Рис. 1.5. Поверхностные явления как результат уменьшения удельной поверхностной энергии:**

*а* — схематическое изображение адсорбции; *б* — пример адгезии (склеивание); *в* — изменение профиля жидкости у твердой поверхности (образование мениска)

### Вопросы практики

Разнообразные поверхностные явления учитываются и используются в различных областях деятельности человека.

Так, адгезия и смачивание играют определяющую роль при изготовлении и нанесении покрытий и красок, гидрофобизации материалов.

Адсорбция лежит в основе процессов очистки воздуха и жидкостей, а адсорбция белков и липидов — важная стадия в функционировании клеточных мембран.

В природных и биологических процессах важную роль играют явления, связанные с существованием электрического заряда на границе раздела фаз: например, оседание капель дождя и перемещение облаков приводят к грозовым разрядам.

### На передовой линии науки

Новые направления исследования поверхностных явлений и их использования связаны с развитием микроэлектроники, космонавтики, биотехнологии, мицеллярного катализа, с разработкой биомембран, биологически совместимых материалов и пр.

### Резюме

*Поверхностные явления — результат стремления системы к уменьшению избыточной поверхностной энергии.*



## 1.4. Общая характеристика дисперсных систем

### 1.4.1. Классификация дисперсных систем по агрегатному состоянию фаз

Дисперсная система состоит как минимум из двух фаз. Сплошную непрерывную фазу (растворитель) называют *дисперсионной средой*, раздробленную фазу (растворенное вещество) — *дисперсной фазой*. Фазы должны быть взаимно нерастворимы.

Приняты условные обозначения дисперсных систем по агрегатным состояниям фаз в формате «фаза/среда», например обозначение Т/Ж означает, что твердая дисперсная фаза распределена в жидкой дисперсионной среде.

Обе фазы (дисперсионная среда и дисперсная фаза) могут находиться в различных агрегатных состояниях, образуя восемь сочетаний, представленных в табл. 1.3. Девятое сочетание «газ — газ» не соответствует дисперсной системе, так как при обычных условиях газы неограниченно смешиваются, не образуя границы раздела.

Слово «золь» сначала являлось синонимом коллоидного раствора, а затем распространилось и на другие высокодисперсные системы с твердой дисперсной фазой. Поэтому коллоидный раствор мелкоизмельченного металлического золота называют золем золота, а йодистого серебра — золем йодистого серебра. В зависимости от природы дисперсионной среды различают *гидрозоли* (Т/Ж), если дисперсионной средой является вода; *аэрозоли* (Т/Г), если дисперсионная среда — воздух; *твердые золи* (Т/Т), если дисперсионная среда — твердая. Так, золь золота в воде — гидрозоль, а дым — аэрозоль. Золи иногда трудно классифицировать по агрегатному состоянию дисперсной фазы.

*Эмульсии* (Ж/Ж) образуются двумя несмешивающимися жидкостями. Обычно одной из фаз в эмульсиях является вода. Примерами эмульсий могут служить молоко, майонез, эмульсия бензола в воде. Системы Ж/Т называют твердыми эмульсиями.

*Пены* состоят из ячеек, заполненных газом и отделенных друг от друга пленками очень малой толщины (жидкими или твердыми). К жидким пенам относятся мыльная пена, муссы и др., к твердым — пемза, пенопласты.

Таблица 1.3

**Классификация дисперсных систем по агрегатному состоянию фаз**

Дисперсная фаза	Дисперсионная среда	Условное обозначение	Системы	Примеры
Твердое вещество	Жидкость	Т/Ж	Золи, суспензии, пасты	Химические осадки, пасты, краски, дно водоемов
Жидкость	Жидкость	Ж/Ж	Эмульсии	Нефть, молоко, кремы
Газ	Жидкость	Г/Ж	Пены	Мыльные, флотационные пены, газированные напитки

Дисперсная фаза	Дисперсионная среда	Условное обозначение	Системы	Примеры
Твердое вещество	Твердое вещество	Т/Т	Твердые золи, сплавы	Минералы, сплавы, строительные и композиционные материалы
Жидкость	Твердое вещество	Ж/Т	Твердые эмульсии, капиллярно-пористые тела	Влажные почвы и строительные материалы, древесина, жемчуг
Газ	Твердое вещество	Г/Т	Твердые пены, пористые тела	Адсорбенты, катализаторы, пенопласты, пемза, пенобетон, хлеб
Твердое вещество	Газ	Т/Г	Аэрозоли, порошки	Дым, пыль, песок, мука
Жидкость	Газ	Ж/Г	Туман	Облака, туман, спреи

Системы, попадающие по этой классификации в один и тот же класс, могут различаться по другим признакам: по размеру частиц, по взаимодействию между частицами, по взаимодействию между дисперсной фазой и дисперсионной средой. Например, к системам типа Т/Ж относятся и суспензии с частицами размером  $10^{-6}$ — $10^{-3}$  м, и золи с частицами размером  $10^{-9}$ — $10^{-7}$  м, а также пасты и гели, представляющие собой структурированные системы.

### Резюме

*Дисперсные системы можно разделить на классы (золи, эмульсии, пены и т.д.) в соответствии с агрегатным состоянием дисперсной фазы и дисперсионной среды.*

#### 1.4.2. Классификация дисперсных систем по взаимодействию между частицами

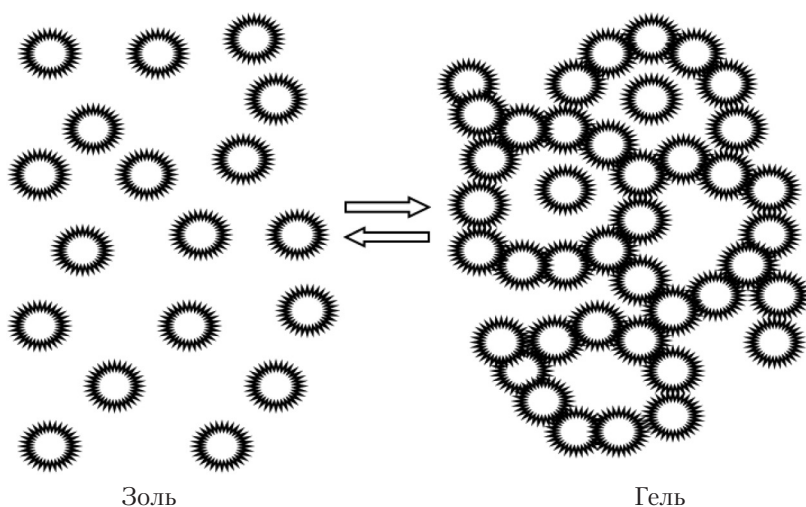
По взаимодействию между частицами системы делятся на свободнодисперсные и связнодисперсные.

К *свободнодисперсным* относят системы, в которых частицы дисперсной фазы свободны, могут независимо друг от друга перемещаться в дисперсионной среде. Такие системы обладают свойствами жидкости, например текучестью. Примеры свободнодисперсных систем — золи, суспензии, аэрозоли.

В *связнодисперсных (структурированных)* системах частицы связаны между собой межмолекулярными силами, образуя трехмерную пространственную структуру (рис. 1.6). К таким системам относят гели, студни, пасты, концентрированные эмульсии, пены. Структурированные (связнодисперсные) системы могут проявлять структурно-механические свойства и твердого тела, и жидкости.

►► О структурированных дисперсных системах см. в параграфе 9.4.

Образование связей между свободными частицами и формирование структуры каркаса связнодисперсной системы обсуждается в терминах перехода золь — гель.



Золь Гель  
*Рис. 1.6. Схема расположения частиц в свободно- и связнодисперсных системах*

К связнодисперсным системам иногда относят и системы с твердой дисперсионной средой, в которой частицы дисперсной фазы также не могут свободно перемещаться, но по иной причине, чем в гелях.

### Резюме

*По взаимодействию между частицами дисперсной фазы различают свобододисперсные (золи, эмульсии) и связнодисперсные системы (гели).*

### 1.4.3. Классификация дисперсных систем по размерам дисперсной фазы

По размерам частиц дисперсной фазы выделяют высоко-, средне- и грубодисперсные системы ( $10^{-9}$ – $10^{-7}$ ,  $10^{-7}$ – $10^{-5}$  и более  $10^{-5}$  м соответственно). Такое разделение не является формальным, как могло бы показаться на первый взгляд, а отражает влияние дисперсности на свойства системы. Дробление вещества приводит к увеличению площади границы раздела фаз и возрастанию доли поверхностных молекул.

◀◀ Увеличение доли поверхностных молекул при дроблении обсуждалось в подпараграфе 1.1.2.

Приведенная на рис. 1.7 схема подчеркивает влияние площади границы раздела фаз (удельной поверхности) на вклад поверхностных свойств в свойства дисперсной системы в целом.

▶▶ Об удельной поверхности см. в параграфе 1.5.3.

*Высокодисперсные системы называют золями, а золи типа Т/Ж — коллоидными растворами. Они проявляют ряд свойств, присущих только этому*

классу систем, — рассеяние света, некоторые молекулярно-кинетические свойства. Частицы таких размеров видны только в ультрамикроскоп или электронный микроскоп. Примерами высокодисперсных систем служат золи (золи золота и серебра — 5–50 нм), некоторые вирусы (вирус гриппа — 100 нм, вирус ящура — 10 нм), частицы дыма при сгорании древесного угля (30–40 нм), тонкие поры активированного угля (1–10 нм). Удельная поверхность высокодисперсных систем может превышать 100 м<sup>2</sup>/г.

►► Оптические свойства и оптические методы исследования дисперсных систем описаны в гл. 3, молекулярно-кинетические — в гл. 8.

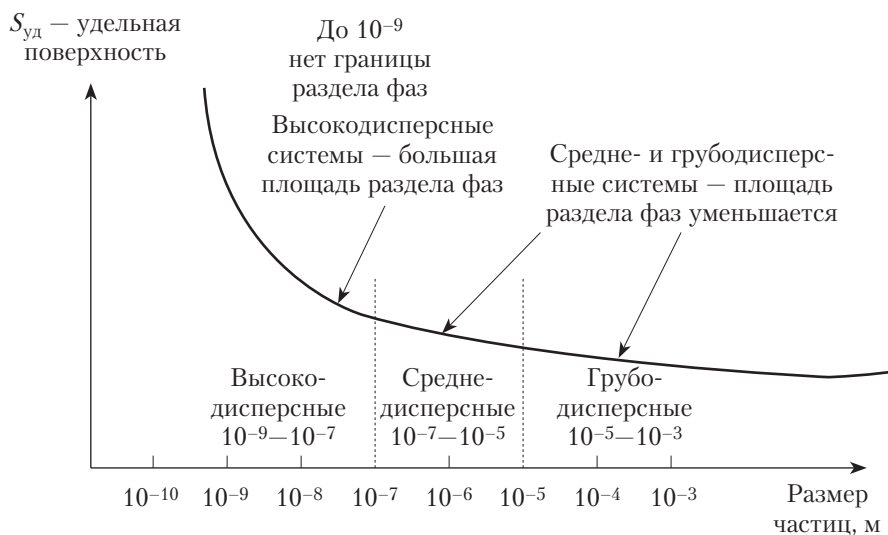


Рис. 1.7. Классификация дисперсных систем по размерам

Ведущие ученые в области коллоидной химии всегда понимали принципиальную важность систематического изучения систем с малыми размерами частиц, однако до середины XX в. экспериментальные методы не были достаточными для выяснения строения высокодисперсных частиц. Возможно, именно это обстоятельство способствовало смещению пика исследований в сторону дисперсных систем с более крупными частицами. Появление высокоразрешающих методов изучения строения веществ (ядерный магнитный резонанс (ЯМР), электронная и атомно-силовая микроскопия и ряд других) позволило перейти к систематическому исследованию строения и свойств высокодисперсных систем.

Частицы *среднедисперсных* систем размером  $10^{-7}$ – $10^{-5}$  м видны в обычный оптический микроскоп, но неразличимы невооруженным глазом. Среднедисперсными системами являются эритроциты крови человека размером 7 мкм, грунт (1–50 мкм), растворимый кофе (10 мкм), мука (1–30 мкм), молоко (около 80 мкм). Удельная поверхность составляет десятки квадратных метров на грамм.

*Грубодисперсные* системы с размерами частиц свыше  $10^{-5}$  м (десятые доли миллиметра) видны невооруженным глазом, их удельная поверхность