

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Курганский государственный университет»

Кафедра физической и прикладной химии

## **КОЛЛОИДНАЯ ХИМИЯ**

Методические указания  
для подготовки к семинарским занятиям по коллоидной химии  
для студентов направления 020201.65  
«Фундаментальная и прикладная химия»

Курган 2017

Кафедра физической и прикладной химии.

Дисциплина: «Коллоидная химия» (специальность 020201.65).

Составитель: канд. хим. наук А.И. Рыкова

Утверждены на заседании кафедры « 29 » августа 2016 г.

Рекомендованы методическим советом университета « 17 » декабря 2015 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

Тема № 1. Теории адсорбции и их практическое приложение .....	4
Тема № 2. Адсорбция на подвижных границах раздела фаз .....	12
Тема № 3. Явления капиллярности и смачивания .....	16
Тема № 4. Устойчивость и коагуляция дисперсных систем .....	20
Тема № 5. Свойства дисперсных систем .....	26
Тема № 6. Коллоквиум .....	36
Список литературы .....	40

## ТЕОРИИ АДСОРБЦИИ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ

Слово *адсорбция* образовано от латинского слова *sorbco* – поглощение и приставки *ad* – то есть «над» или «у» и означает поглощение (точнее концентрирование) каких-либо компонентов из объема гомогенных сопредельных фаз на поверхности раздела этих фаз. Международным союзом чистой и прикладной химии (IUPAC) предложены основные термины: *адсорбент* – вещество, на котором происходит адсорбция; *адсорбат* – уже адсорбированное вещество, находящееся на поверхности или в объеме пор адсорбента; *адсорбтив* – вещество, способное адсорбироваться, но еще не адсорбированное; *десорбция* – процесс, обратный адсорбции.

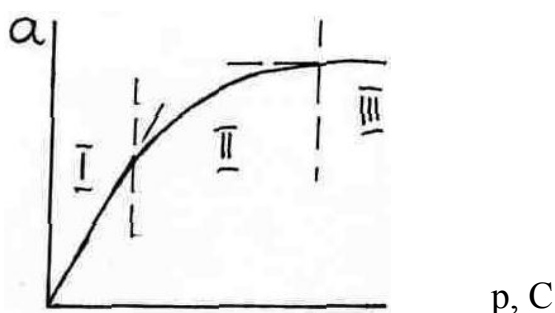
Количественно адсорбцию можно характеризовать количеством адсорбата, находящегося в объеме адсорбционного слоя, приходящегося на единицу массы адсорбента ( $a$ , моль/г); количеством адсорбированного вещества, приходящимся на единицу поверхности адсорбента ( $\alpha$ , моль/м<sup>2</sup>) или избытком числа молей адсорбата в поверхностном слое площадью 1 см<sup>2</sup> по сравнению с числом его молей в объеме раствора (адсорбция Гиббса, моль/г, моль/см<sup>2</sup>).

Обычно выделяют два предельных случая адсорбции: химическую или хемосорбцию и физическую или физадсорбцию. Типичная *хемосорбция* – это химическая реакция между адсорбатом и поверхностными атомами или группами атомов адсорбента. Типичная *физадсорбция* осуществляется только за счет сил межмолекулярного взаимодействия без переноса и обобществления электронов.

Традиционные методы определения величин адсорбции разных компонентов делят на статические и динамические. При *статических методах* адсорбент помещается в атмосферу газа или пара, после установления равновесия измеряется равновесное давление и количество поглощенного адсорбата, которое можно измерить двумя способами. *Весовой способ*

применяется в вакуированных установках; адсорбент помещают в чашку на кварцевой спирали, растяжение которой пропорционально массе адсорбента. Чувствительность современных весов до  $10^{-8}$  г. *Объемный способ* применяют при малой величине адсорбции; определяют объем, давление и температуру в установке до и после установления равновесия. По разности объемов (н.у.) определяют адсорбцию. Статические методы обычно применяют при изучении адсорбции индивидуальных газов и паров. При *динамических методах* адсорбат пропускают через слой адсорбента. Адсорбцию характеризуют временем до появления газа или пара. Данные методы применяют при адсорбционном анализе смесей.

Графически адсорбцию отображают с помощью различных зависимостей: изобара –  $a = f(T)$  при  $p$ -Const, изопикна –  $a = f(T)$  при  $C$ -Const, изостера –  $p = f(T)$  или  $C = f(T)$  при  $a$ -Const, изотерма –  $a = f(p)$  или  $a = f(C)$  при  $T$ -Const. Важнейшее практическое значение имеют изотермы адсорбции.



I – область Генри, II – промежуточная степень заполнения, III – область насыщения

Рисунок 1 – Изотерма адсорбции

Для определения констант, характеризующих изотермы адсорбции по разным теоретическим положениям, применяют графический способ. Для этого уравнение изотермы представляют в виде уравнения прямой линии:  $y = a + bx$ . Изотерму перестраивают в линейных координатах  $y = f(x)$  и по графику находят значения  $a$  и  $b$ .

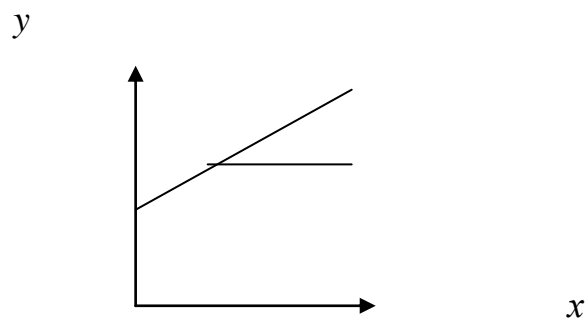


Рисунок 2 – Изотерма адсорбции в линейных координатах: отрезок, отсекаемый на оси ординат, равен  $a$ , тангенс угла наклона прямой равен  $b$

*Уравнение Генри* – простейшая закономерность, полученная для однородной поверхности (сажа, прокаленная при  $3000^{\circ}\text{C}$ ). Адсорбционное равновесие рассматривается как равновесие распределения молекул газа между поверхностным слоем и объемной фазой. Поверхностный слой мономолекулярный, толщина его зависит от размеров молекул газа и их ориентации.

$a = Kp$ , то есть при малых давлениях газа величина адсорбции пропорциональна давлению (концентрации) газа в газовой фазе.

*Уравнение Фрейндлиха*  $a = Kp^{1/n}$ ,

где  $1/n$  – правильная дробь, характеризующая приближение изотермы к прямой линии,  $K$  – константа, имеющая физический смысл предельной адсорбции; в области насыщения  $a = K = a_m$ . Константы уравнения Фрейндлиха определяют графически по изотерме, построенной в логарифмических координатах:  $\lg a = \lg K + \lg p$ .

*Уравнение Лэнгмюра*  $a = \frac{a_m Kp}{1 + Kp}$ ,

где  $a_m$  – предельная адсорбция (моль/г),  $K$  – константа адсорбционного равновесия.

Для определения констант уравнение представляют в линейной форме (делят на  $p$  обе части):  $\frac{1}{a} = \frac{1}{a_m} + \frac{1}{Ka_m} \frac{1}{p}$  и используют графический способ. Зная

величину  $a_m$ , можно определить *удельную поверхность адсорбента*:

$S = a_m \cdot \omega_0 \cdot N_A$ , где  $\omega_0$  – посадочная площадка или площадь, занимаемая молекулой адсорбата в насыщенном мономолекулярном адсорбционном слое,  $m^2$ .

Теория Лэнгмюра основана на предположении образования монослоя, поэтому хорошо применима для анализа изотерм адсорбции на границе «раствор – газ» и «твердое тело – раствор» и определения размеров молекул адсорбатов в адсорбционном слое.

$$\text{Уравнение Брунауэра – Эммета – Теллера (БЭТ)} \quad a = \frac{a_m C \frac{p}{p_s}}{(1 - \frac{p}{p_s}) [1 + (C - 1) \frac{p}{p_s}]},$$

где  $a_m$  – предельная адсорбция или емкость монослоя, моль/г,  $C$  – константа, связанная с константой равновесия адсорбции в первом адсорбционном слое и константой конденсации пара адсорбата, характеризует энергетический аспект адсорбции,  $p/p_s$  – относительное давление паров адсорбата,  $p_s$  – давление насыщенных паров адсорбата при данной температуре.

Уравнение БЭТ не учитывает энергетической неоднородности поверхности, поэтому при  $p/p_s < 0,05$  не применимо. При относительном давлении больше 0,3 следует учитывать капиллярную конденсацию паров. Так как теория БЭТ основана на представлениях конденсации, она применима для описания адсорбции паров, но не газов.

Для определения констант уравнение БЭТ представляют в линейной форме, величина  $a_m$  также позволяет определить удельную поверхность

$$\text{адсорбента: } \frac{\frac{p}{p_s}}{a(1 - \frac{p}{p_s})} = \frac{1}{a_m C} + \frac{C - 1}{a_m C} \frac{p}{p_s}.$$

Адсорбция растворенных веществ на твердых телах обычно определяется экспериментально. В раствор с концентрацией  $C_0$  и объемом  $V$  вводят  $m$  граммов адсорбента. В результате избирательной адсорбции одного из компонентов концентрация раствора изменяется и при адсорбционном равновесии становится равной  $C$ . Для непористых и крупнопористых адсорбентов адсорбцию определяют по формуле:  $a = \frac{(C_0 - C)V}{m}$ .

*Капиллярная конденсация* и *гистерезис* наблюдаются в мезопористых системах и приводят к объемному заполнению пор жидкой фазой адсорбата при относительном давлении паров  $p/p_s < 1,0$ . Причина капиллярной конденсации – образование вогнутых менисков адсорбированной фазы, равновесное давление над которыми определяется *уравнением Кельвина*  $\frac{p}{p_s} = \exp\left[-\frac{2\sigma V_m}{rRT}\right]$ , где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкого адсорбата, н/м;  $V_m$  – молярный объем адсорбата, м<sup>3</sup>/моль;  $r$  – радиус мениска, м.

Капиллярная конденсация в поре начинается при адсорбции в сферическом мениске, а десорбция происходит из цилиндрического мениска, радиус которого в 2 раза меньше шарообразного. В результате на изотерме возникает петля гистерезиса. Для определения размеров «горла» поры следует использовать десорбционную ветвь изотермы.

### Задачи

1 Используя данные адсорбции азота на слюде при 90 К, определить графическим методом константы  $K$  и  $1/n$  в уравнении Фрейндлиха:

$p$ , Па	530	990	1730	2370	4530
$a$ , м <sup>3</sup> /кг	14,9	19,1	24,2	27,3	36,8.

2 При изучении адсорбции брома углем из воды были получены следующие данные:

$C(Br_2)$ , моль/л	0,259	0,669	1,708	2,998
$a$ , ммоль/г	3,1	4,27	5,44	6,80.



Определить константы уравнения Лэнгмюра графическим методом.

3 По изотерме адсорбции азота определите удельную поверхность адсорбента ( $T = 77 \text{ K}$ ,  $\omega_0(\text{N}_2) = 16,2 \text{ \AA}^2$ ):

$p/p_s$	0,04	0,09	0,16	0,20	0,30
$a$ , ммоль/г	2,20	2,62	2,94	3,11	3,58.

4 В растворе  $\text{AgNO}_3$  концентрацией  $1 \text{ моль/м}^3$  объемом  $50 \text{ мл}$  диспергировано  $12 \text{ г}$  порошкообразного  $\text{AgCl}$ . В результате адсорбции концентрация ионов серебра в растворе понизилась до  $0,8 \text{ моль/м}^3$ . Вычислите адсорбцию ионов серебра. (Ответ:  $0,83 \text{ мкмоль/г}$ .)

5 Построить кривую капиллярной конденсации, интегральную и дифференциальную кривые распределения пор адсорбента по радиусам по данным конденсации паров метилового спирта на силикагеле при  $293 \text{ K}$ . Показать наличие петли гистерезиса.  $\sigma(\text{CH}_3\text{OH}) = 22,6 \text{ мДж/м}^2$ ,  $V_m = 0,0406 \text{ м}^3/\text{моль}$ .

$P/P_s$	0,125	0,25	0,5	0,62	0,75	0,86	1,0
Адсорбция, ммоль/г	2,5	3,5	4,8	6,3	13,0	19,0	22,5
Десорбция, ммоль/г	2,5	3,9	5,2	6,7	17,5	21,0	22,5.

6 Рассчитать и построить интегральную и дифференциальную кривые распределения объема пор по радиусам по данным порограмм карбонатного покрытия, полученного электрофоретическим методом.  $\sigma(\text{Hg}) = 470,9 \text{ мДж/м}^2$ ;  $\Theta = 142^\circ$ .

$P \cdot 10^{-5}$ , Па	$V \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> /кг	$P \cdot 10^{-5}$ , Па	$V \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> /кг	$P \cdot 10^{-5}$ , Па	$V \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> /кг
31,17	10	71,0	35	401	117
41,17	15	101,0	38	501	122
51,0	22	201	52	601	135
61,0	32	301	100	701	160

## Вопросы и задачи для самостоятельного решения

- 1 Сформулируйте основные положения теории Лэнгмюра.
- 2 Сформулируйте основные положения теории БЭТ.
- 3 Какова природа адсорбционных сил?
- 4 Что такое изотерма адсорбции, изостера адсорбции?
- 5 В чем сущность весового и объёмного методов измерения изотерм адсорбции?

6 Как можно определить теплоту адсорбции?

7 Как классифицируют адсорбенты? Приведите примеры наиболее распространенных адсорбентов и их использования.

8 По изотерме адсорбции бензола при 293 К определить удельную поверхность адсорбента, если  $\omega_0(\text{C}_6\text{H}_6) = 0,49 \text{ нм}^2$ :

$p/p_s$	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30
$a$ , ммоль/г	0,36	0,51	0,60	0,68	0,82.

9 По изотерме адсорбции азота определите удельную поверхность адсорбента ( $T = 77 \text{ К}$ ,  $\omega_0(\text{N}_2) = 0,162 \text{ нм}^2$ ). Объем адсорбированного газа приведен к нормальным условиям:

$p/p_s$	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
$a$ , м <sup>3</sup> /кг	0,07	0,11	0,117	0,132	0,145	0,155.

10 По экспериментальным данным адсорбции углекислого газа на активированном угле определите константы уравнения Лэнгмюра, пользуясь которыми рассчитайте и постройте кривую адсорбции:

$P \cdot 10^{-2}$ , Па	9,9	49,7	99,8	200,0	297,0	398,5
$\Gamma \cdot 10^3$ , кг/кг	32,0	70,0	91,0	102,0	107,3	108,0.

11 Определите константы уравнения Фрейндлиха при адсорбции СО коксовым углем. Условия опыта:

$P \cdot 10^{-3}$ , Па	1,34	2,50	4,25	5,71	7,18	8,90
$a$ , ммоль/кг	0,38	0,58	1,016	1,17	1,33	1,46.

12 При адсорбции бензойной кислоты углем из раствора в бензоле при 25<sup>0</sup>С получены следующие данные:

$C \cdot 10^{-3}$ , моль/м <sup>3</sup>	0,006	0,025	0,053	0,118
a, моль/кг	0,44	0,78	1,04	1,44.

Определите графическим способом константы уравнения Фрейндлиха.

13 Вычислите равновесную концентрацию уксусного альдегида, если 10 г активированного древесного угля адсорбирует 25,7 ммоль уксусного альдегида.

Константы уравнения Фрейндлиха:  $K = 14,2$  ммоль/г;  $n = 1,75$ .

(Ответ: 0,05 моль/л.)

14 При введении 1 г активированного угля в 100 мл водного раствора метиленовой сини концентрация красителя меняется от начальной  $1 \cdot 10^{-4}$  моль/л до равновесной  $6 \cdot 10^{-5}$  моль/л, а при добавлении 2 г угля к такому же исходному раствору равновесная концентрация составила  $4 \cdot 10^{-5}$  моль/л. Площадь, занимаемая молекулой красителя на поверхности, равна  $1,65 \text{ нм}^2$ . Рассчитайте удельную поверхность угля, считая, что адсорбция описывается уравнением Лэнгмюра. (Ответ:  $11,9 \text{ м}^2/\text{г}$ .)

15 По экспериментальным данным сорбции паров гептана на силикагеле при 293 К построить кривую капиллярной конденсации. Показать наличие петли гистерезиса и построить интегральную и дифференциальную кривые распределения пор по радиусам.  $\sigma (\text{C}_7\text{H}_{16}) = 22 \text{ мДж/м}^2$ ,  $V_m = 0,147 \text{ м}^3/\text{моль}$ .

$P/P_s$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Адсорбция, ммоль/г	3,7	4,8	7,1	14,1	18,7	21,0
Десорбция, ммоль/г	3,7	5,5	12,4	17,5	19,6	21,0.

16 По экспериментальным данным сорбции паров воды на активированном угле при 293 К построить кривую капиллярной конденсации. Показать наличие петли гистерезиса и построить интегральную и дифференциальную кривые распределения пор по радиусам.  $\sigma (\text{H}_2\text{O}) = 72,5 \text{ мДж/м}^2$ .

$P/P_s$	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,98
Адсорбция, ммоль/г	3,75	5,3	6,2	8,75	10,4	12,5	13,4

Десорбция, ммоль/г    3,75    7,0    7,9    10,0    11,5    13,0 13,4.

17 Рассчитать и построить интегральную и дифференциальную кривые распределения объема пор по радиусам по данным порограмм активированного угля.  $\sigma$  (Hg) = 470,9 мДж/м<sup>2</sup>;  $\Theta$  = 142<sup>0</sup>.

$P \cdot 10^{-5}$ , Па	$V \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> /кг	$P \cdot 10^{-5}$ , Па	$V \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> /кг	$P \cdot 10^{-5}$ , Па	$V \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> /кг
20,2	10,0	74,2	100,2	300,0	190,0
40,2	51,0	100,2	160,0	400,0	200,0
50,2	60,5	150,0	180,0	500,0	201,0
62,2	80,2	200,0	185,0	603,0	201,0

## Тема № 2

### АДСОРБЦИЯ НА ПОДВИЖНЫХ ГРАНИЦАХ РАЗДЕЛА ФАЗ

*Поверхностный слой* – это переходная область между соприкасающимися фазами в гетерогенной системе, свойства которой отличаются от свойств составляющих систему фаз. Механическая работа по отношению к поверхностному слою при постоянной его толщине заключается только в изменении его площади:  $dA = \sigma ds$ . Коэффициент  $\sigma$ , определяемый как отношение работы, затраченной на изменение площади поверхности, к этому изменению – это *удельная свободная поверхностная энергия* (Дж/м<sup>2</sup> = 1000 эрг/см<sup>2</sup>). Величиной, эквивалентной свободной поверхностной энергии, является *поверхностное натяжение* – это сила, отнесенная к единице длины контура, ограничивающего поверхность раздела, действующая вдоль поверхности и препятствующая увеличению её площади:  $[\sigma] = \text{н/м} = 1000 \text{ дин/см}$ . Оба аспекта  $\sigma$  вызваны одной причиной – особым положением молекул на границе раздела фаз и нескомпенсированностью межмолекулярных взаимодействий.

Свободная поверхностная энергия может уменьшаться за счет снижения  $\sigma$  или уменьшения площади поверхностного слоя. Для индивидуальных

жидкостей характерно изменение формы (шар имеет минимальную площадь, ограничивающую объем), мелко раздробленные твердые тела и жидкости уменьшают свободную поверхностную энергию за счет агрегации, а твердые тела и растворы – путем адсорбции или ориентации несимметричных молекул на границе раздела фаз.

Фундаментальное уравнение адсорбции Гиббса  $-d\sigma = \sum n_i/s d\mu_i = \sum \Gamma_i d\mu_i$  применимо к любой границе раздела фаз. На

практике уравнение в основном используется для границы «раствор–газ», так как легко измерить  $\sigma$ . В этом случае уравнение приобретает форму:

$$\Gamma = -\frac{c}{RT} \times \frac{d\sigma}{dc}$$

Вещества, уменьшающие  $\sigma$  растворителя, называются поверхностно-активными (ПАВ). В случае воды к ним относятся органические вещества с дифильными молекулами: спирты, альдегиды, кетоны, амины, карбоновые кислоты и их соли, аминокислоты, белки, углеводы. Поверхностная

активность  $g = \left( \frac{d\sigma}{dc} \right)_{c \rightarrow 0}$  для ПАВ отрицательна, а адсорбция –

положительна. Поверхностная активность ПАВ зависит от числа полярных групп в молекуле, полярности функциональной группы и длины углеводородного радикала. С ростом длины цепи на группу атомов  $-\text{CH}_2-$  поверхностная активность  $g$  увеличивается в 3 – 3,5 раза (*правило Дюкло – Траубе*).

В результате адсорбции ПАВ на границе «раствор – воздух» или «твердое тело – раствор» образуются пленки: газообразные, жидкие и твердые. Представления о существовании пленок позволяют определять удельную поверхность адсорбента и размер молекул ПАВ. Зная предельную адсорбцию  $\Gamma_\infty$  (моль/м<sup>2</sup>) и число молей ПАВ ( $n$ ), адсорбированных поверхностью в условиях образования сплошного мономолекулярного слоя, можно вычислить

поверхность адсорбента:  $s = n/\Gamma_{\infty}$ . Площадь, занимаемая одной молекулой ПАВ в поверхностном слое, не зависит от длины молекулы и природы поверхности, но определяется полярной группой:  $s_{\infty} = \frac{1}{\Gamma_{\infty} N_A}$ . Так, по литературным данным площадь, занимаемая одной группой OH, равна  $(20-22) \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ , а группой COOH –  $2,05 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$ . Толщину пленки ПАВ (длину молекулы) можно определить по формуле:  $l = \Gamma_{\infty} V_m = \frac{\Gamma_{\infty} M}{d}$ , где  $d$  – плотность ПАВ,  $\text{г/м}^3$ . Одна метиленовая группа  $-\text{CH}_2-$  соответствует расстоянию  $1,43 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ . Зная длину молекулы, легко установить формулу ПАВ.

### Задачи

- 1 Вычислите величину адсорбции ПАВ и его поверхностную активность для 0,03 моль/л раствора при 20°C, если поверхностное натяжение 0,055 моль/л его раствора в воде равно 42,8 мН/м, а поверхностное натяжение воды при этой температуре равно  $72,75 \cdot 10^{-3} \text{ н/м}$ . (Ответ:  $0,54 \text{ н} \cdot \text{м}^2/\text{кмоль}$ ;  $6,65 \cdot 10^{-9} \text{ кмоль/м}^2$ .)
- 2 Пользуясь правилом Дюкло – Траубе, определите, во сколько раз поверхностная активность гексановой кислоты меньше поверхностной активности нонановой кислоты. (Ответ: в 32,8 раз.)
- 3 Определите площадь, занимаемую одной молекулой в насыщенном слое анилина на поверхности его водного раствора, если предельная адсорбция  $\Gamma_{\infty}$  равна  $6,5 \cdot 10^{-9} \text{ кмоль/м}^2$ . (Ответ:  $2,56 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$ .)
- 4 Полистирольный сульфокатионит в  $\text{H}^+$  форме в количестве 1 г внесли в раствор KCl с концентрацией 100 моль/м<sup>3</sup> объемом 50 мл и смесь выдержали до равновесного состояния. Константа адсорбционного равновесия 2,5. Полная обменная емкость катионита 5 моль/кг. Определите равновесную концентрацию ионов калия в ионите. (Ответ:  $7,5 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л}$ .)
- 5 Сколько граммов магния останется в растворе, если через колонку с 9 г катионита пропустить 500 мл раствора соли магния с концентрацией 0,03 н.? Полная динамическая ёмкость катионита 1,2 ммоль/г. (Ответ: 0,10206 г.)

6 Анионит, имеющий  $-\text{CH}_2\text{SH}-$  ионогенную группу, внесли в раствор  $\text{CaCl}_2$  с концентрацией 0,1 моль/л объемом 75 мл. Масса анионита 1,5 г. Смесь выдержали до состояния адсорбционного равновесия. Константа равновесия 2,7. Полная обменная ёмкость анионита 4,4 моль/кг. Определите равновесную концентрацию хлорид-ионов в ионите и величину адсорбции.

(Ответ: 0,197 моль/л,  $1,71 \cdot 10^{-4}$  моль/г.)

7 Активная поверхность 1 г силикагеля составляет  $465 \text{ м}^2$ . Сколько молекул брома поглощается  $1 \text{ см}^2$  поверхности адсорбента при адсорбции на 10 г силикагеля 5 мг брома? (Ответ:  $4 \cdot 10^{11}$  молекул.)

### Вопросы и задачи для самостоятельного решения

1 Чем вызвана нескомпенсированность межмолекулярного взаимодействия на границе раздела фаз?

2 Укажите причины появления избытка поверхностной энергии. Что такое удельная свободная поверхностная энергия?

3 Что такое поверхностное натяжение и как его можно выразить через термодинамические функции состояния?

4 Как выразить изменение энергии Гиббса на поверхности раздела фаз?

5 Какими путями возможно снижение поверхностной энергии на различных границах раздела фаз?

6 Объясните причину интенсификации химических, физических и других процессов в связи с раздробленностью и кривизной частиц дисперсной фазы.

7 Что такое капиллярная конденсация? Приведите уравнение капиллярной конденсации (Томсона-Кельвина). В чем причина появления адсорбционного гистерезиса?

8 Определите поверхностную активность и значение адсорбции при  $15^\circ$  для водного раствора ацетона 0,025M, если поверхностное натяжение раствора равно  $44,7 \cdot 10^{-3}$  н/м, поверхностное натяжение воды при данной температуре  $73,49 \cdot 10^{-3}$  н/м. (Ответ:  $1,15 \cdot 10^{-3}$  Н $\cdot$ м<sup>2</sup>/моль;  $1,2 \cdot 10^{-5}$  моль/м<sup>2</sup>.)

9 Вычислите длину и площадь молекулы изогептанола в насыщенном адсорбционном слое, если  $\Gamma_{\infty} 6,9 \cdot 10^{-7}$  моль/м<sup>2</sup>, а плотность спирта 0,89 г/мл. (Ответ:  $2,4 \cdot 10^{-18}$  м<sup>2</sup>,  $8,9 \cdot 10^{-11}$  м.)

10 Определите предельную величину адсорбции гептанола, если площадь, приходящаяся на одну молекулу в насыщенном адсорбционном слое, равна  $2,5 \cdot 10^{-19}$  м<sup>2</sup>. Одинакова ли толщина насыщенного слоя для гексанола и октанола? Дайте обоснованный ответ. Изобразите графически, как ориентируются молекулы гексанола в насыщенном адсорбционном слое на границах раздела: а) «вода – воздух»; б) «вода – бензол». (Ответ:  $6,64 \cdot 10^{-6}$  моль/м<sup>2</sup>.)

11 Определите величину адсорбции (кмоль/м<sup>2</sup>) для водных растворов изовалерьяновой кислоты при 15<sup>0</sup>С, исходя из следующих данных:

Концентрация кислоты, кмоль/м <sup>3</sup>	0,032	0,25
Поверхностное натяжение, н/м	$57,5 \cdot 10^{-3}$	$35,0 \cdot 10^{-3}$ .

Поверхностное натяжение воды при 15<sup>0</sup>С равно  $73,4 \cdot 10^{-3}$  н/м.

(Ответ:  $6,64 \cdot 10^{-6}$  кмоль/м<sup>2</sup>;  $1,6 \cdot 10^{-5}$  кмоль/м<sup>2</sup>.)

12 На поверхность воды был нанесен раствор, содержащий 0,0065 г олеиновой кислоты в бензоле. После испарения бензола олеиновая кислота равномерно распределилась на поверхности воды. Площадь мономолекулярного слоя кислоты составила 368 см<sup>2</sup>. Каково поперечное сечение молекулы олеиновой кислоты? (Ответ:  $2,65 \cdot 10^{-21}$  м<sup>2</sup>.)

### Тема № 3

## ЯВЛЕНИЯ КАПИЛЛЯРНОСТИ И СМАЧИВАНИЯ

В гетерогенной системе можно выделить два типа взаимодействия: между частицами внутри одной фазы – *когезия*, между частицами разных фаз – *адгезия*. Работу молекулярных сил внутри фаз и на границе между ними можно выразить через величину *поверхностного натяжения* ( $\sigma$ , н/м) или *удельной*



свободной поверхностной энергии ( $\sigma$ , Дж/м<sup>2</sup>). Введем обозначения: 1 – жидкость, 2 – газ, 3 – твердое тело. Поверхностное натяжение на границе «жидкость – газ» равно  $\sigma_{12}$ . При разрыве связей между молекулами внутри жидкости образуется два поверхностных слоя «жидкость – газ». Следовательно, работа сил когезии может быть вычислена по уравнению:  $A_k = 2\sigma_{12}$ . Работа разрыва межфазового поверхностного слоя характеризуется уравнением Дюпре:  $A_a = \sigma_{12}(1 + \cos\theta)$ , где  $\theta$  – угол смачивания или краевой угол. Если жидкость не смачивает поверхность, угол смачивания тупой, величина  $\cos\theta < 0$ , уравнение Дюпре принимает вид:  $A_a = \sigma_{12}(1 - \cos\theta)$ . Этим уравнением характеризуют адгезию жидкости к пузырьку, то есть к гидрофобной среде – воздуху.

При смачивании часто возникает искривленная поверхность, изменяющая свойства поверхностного слоя. Так, давление в двух объемных фазах, разделенных искривленной поверхностью, в состоянии равновесия различно. Причем независимо от агрегатного состояния фаз давление с вогнутой стороны поверхности всегда больше, чем с выпуклой. Разность давлений в двух соприкасающихся фазах, разделенных искривленной поверхностью, называется капиллярным давлением  $\Delta P$  (Па). Зависимость капиллярного давления от кривизны поверхности характеризуется уравнением Лапласа:

- для поверхности сферической формы:  $\Delta P = \frac{2\sigma}{R}$ , где  $R$  – радиус кривизны;
- если поверхность имеет неправильную форму, используют представления средней кривизны с главными радиусами  $R_1$  и  $R_2$ :  $\Delta P = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ ;
- для цилиндрической кривизны  $R_1 = R$ ,  $R_2 = \infty$ :  $\Delta P = \frac{\sigma}{R}$ .

Одним из важнейших следствий существования капиллярного давления является способность жидкостей подниматься (опускаться) в тонких трубках (капиллярах). Высоту, на которую способна подняться жидкость, можно рассчитать по уравнению Жюрена:  $h = \frac{2\sigma \cos\theta}{rg(\rho^\beta - \rho^\alpha)}$ , где  $r$  – радиус капилляра,  $\rho^\beta$  –

плотность жидкости, если фаза  $\alpha$  – газ или пар, то его плотностью можно пренебречь.

Дисперсность, характеризуемая кривизной поверхности, влияет и на термодинамическую реакционную способность веществ, которая характеризует способность вещества переходить в какое-либо другое состояние. Приращение энергии Гиббса за счет дисперсности можно представить в виде *объединенного уравнения I и II начал термодинамики*:  $dG = -SdT + VdP$ . Для индивидуального вещества  $V = V_m$ , а при  $T = \text{Const}$   $dG = V_m dP$  или  $\Delta G = V_m \Delta P$ . Из уравнения Лапласа  $\Delta P = \frac{2\sigma}{R}$ , следовательно,  $\Delta G = \pm \frac{2\sigma V_m}{R}$ , где плюс – положительная или выпуклая кривизна, а минус – отрицательная или вогнутая кривизна.

### Задачи

1 Для 0,1%-го раствора эфиров сахарозы, поверхностное натяжение которого составляет  $30 \text{ мДж/м}^2$ , определить равновесную работу когезии, адгезии и работу адгезии к пузырьку, если краевой угол смачивания к твердой поверхности равен  $15^\circ$ . (*Ответ*: 60; 57,9; 2,1 мДж/м<sup>2</sup>.)

2 Чему равно капиллярное давление и приращение энергии Гиббса для капель жировой фракции майонеза диаметром 35 мкм? Межфазовое поверхностное натяжение  $55 \text{ мДж/м}^2$ , мольный объем жира  $0,19 \text{ м}^3/\text{моль}$ . (*Ответ*: 6,3кПа;  $1,19 \cdot 10^3$  Дж.)

3 Вертикально установленная стеклянная капиллярная трубка с внутренним диаметром 300 мкм одним концом погружена в воду на глубину 3 см, а вторым соединена с сосудом, в котором поддерживается избыточное давление. Определить, при каком давлении в сосуде будет происходить отрыв пузырька воздуха от погруженного в жидкость конца трубки, если поверхностное натяжение воды  $0,073 \text{ н/м}$ , плотность воды  $1000 \text{ кг/м}^3$ . (*Ответ*: 1267 Па.)

4 На какую высоту поднимается вода по стеклянному капилляру, частично в нее погруженному, если его диаметр 0,5 мм? (*Ответ*: 0,06 м.)

5 Какова разность уровней воды в двух сообщающихся капиллярах диаметром 0,5 мм и 0,15 мм? Угол смачивания считать равным  $0^0$ .

(Ответ: 0,14 м.)

6 Капля воды массой 0,1 г введена между двумя плоскими параллельными между собой пластинами, смачиваемыми водой ( $\Theta = 0^0$ ). Какова работа сил адгезии между пластинами, если они находятся на расстоянии  $10^{-4}$  см?

(Ответ: 0,03 Дж.)

7 Между двумя плоскими стеклянными пластинами помещен 1 г ртути. Какую силу надо приложить к верхней пластине, чтобы ртуть приняла форму круглой лепешки однородной толщины и радиуса 5 см, если поверхностное натяжение ртути 0,487 н/м,  $\Theta = 40^0$ , плотность ртути  $13,55 \text{ г/см}^3$ ?

(Ответ: 650,7 Н.)

8 Оценить эффективный радиус пор силикагеля, если для его определения методом ртутной порометрии пришлось приложить давление 80,1 атм. Угол смачивания принять равным  $180^0$ . (Ответ:  $1,2 \cdot 10^{-7}$  м.)

### Вопросы и задачи для самостоятельного решения

1 Что такое адгезия, когезия?

2 Дайте характеристику равновесной работы адгезии как компенсации избытка свободной поверхностной энергии.

3 Что такое краевой угол смачивания и как он определяется?

4 Что такое адгезия жидкости и смачивание? Приведите примеры гидрофильных (лиофильных) и гидрофобных (лиофобных) поверхностей.

5 В чем особенности адгезии твердых тел и как зависит адгезия от формы и размеров твердого тела? Приведите примеры адгезии пищевых масс.

6 Определить диаметр стеклянной трубки, если при ее частичном погружении в воду жидкость поднимается на 6 см. Угол смачивания принять равным  $0^0$ . (Ответ:  $5 \cdot 10^{-4}$  м.)

7 Капля воды массой 0,18 г введена между двумя плоскими параллельными между собой пластинами, угол смачивания которых  $45^{\circ}$ . Какова работа адгезии между пластинами, если они находятся на расстоянии 1 мкм?

(Ответ: 0,046 Дж.)

8 С какой силой притягивается друг к другу стеклянные пластинки площадью  $10 \times 10$  см, находящиеся на расстоянии 1 мкм, если зазор между ними заполнен водой ( $\Theta = 0^{\circ}$ )? (Ответ: 1460 Н.)

9 Определите максимальную массу воды, которую можно налить в решето с парафинированным дном диаметром 20 см, если последнее сделано из металлического листа с круглыми отверстиями диаметром 1 мм. Поверхностное натяжение воды 72 мН/м. (Ответ: 0,92 кг.)

10 Сульфо-феноло-формальдегидный катионит (КУ-5) в количестве 2 г внесли в раствор хлорида натрия с концентрацией 0,2 моль/л объемом 100 мл и смесь выдержали до равновесного состояния. Полная обменная ёмкость катионита 2,8 моль/кг. Константа адсорбционного равновесия 3,3. Определите равновесную концентрацию ионов натрия в катионите. (Ответ: 0,197 моль/л.)

#### Тема № 4

### УСТОЙЧИВОСТЬ И КОАГУЛЯЦИЯ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

Проблема устойчивости лиофобных зольей одна из самых важных и сложных в коллоидной химии, так как является проблемой жизни и смерти дисперсных систем. Устойчивость характеризуется неизменностью во времени основных параметров системы: дисперсности и равномерного распределения частиц фазы в среде. В результате различных внешних воздействий на систему (температура, концентрирование, механические воздействия, ультразвук, электрический ток, действие электролитов и др.) частицы фазы могут слипаться, их размеры увеличиваются, и они оседают под действием силы тяжести. То есть происходит разрушение дисперсной системы. Процесс

укрупнения частиц, примерно одинаковых по размерам, называется *коагуляция* (coagulatio (лат.) – свертывание, сгущение).

Одним из основных факторов, приводящих к коагуляции, является присутствие в системе электролитов. Все без исключения электролиты при увеличении их концентрации в системе выше некоторого значения вызывают коагуляцию. Минимальная концентрация электролита, при которой начинается коагуляция, называется *пороговой концентрацией* или *порогом коагуляции*

(моль/л или ммоль/л):  $C_n = \gamma = \frac{C_{эл} V_{эл}}{V_{эл} + V_{золя}}$ , где  $C_{эл}$  – молярная концентрация электролита,  $V_{эл}$  и  $V_{золя}$  – объемы электролита и золя соответственно.

*Коагулирующая способность* электролита выражается объемом золя, коагулируемым одним молем электролита:  $V_k = \frac{1}{\gamma}$ , и измеряется в мл/моль.

Коагулирующее действие электролитов в основном подчиняется *правилу Шульце – Гарди*: коагулирующее действие оказывает противоион (ион, противоположный по знаку заряду частицы), и коагулирующая способность возрастает пропорционально некоторой высокой степени его заряда. Коагулирующие способности одно-, двух- и трехвалентных ионов соотносятся так:  $\pm 1 \div \pm 2 \div \pm 3 = 1 \div 50 - 70 \div 500 - 700$ , в общем случае как единицы к десяткам и к сотням. Эмпирическое правило Шульце – Гарди было с успехом обосновано теорией устойчивости дисперсных систем *Дерягина – Ландау – Фервея – Овербека* или *теорией ДЛФО*, согласно расчетам которой коагулирующая способность пропорциональна 6 степени заряда иона ( $1 \div 63 \div 769$ ).

Количественной мерой коагуляции является *скорость* – изменение числа частиц дисперсной фазы в единицу времени. Кинетика быстрой коагуляции была разработана *Смолуховским* (1916) на основе теорий броуновского движения и диффузии частиц. В случае *быстрой коагуляции* все соударения частиц эффективны, то есть приводят к их объединению. *Основное уравнение* теории Смолуховского для подсчета общего числа частиц в системе  $v$  имеет

вид:  $\nu = \frac{\nu_0}{1 + kt\nu_0}$ , где  $\nu_0$  – начальное число частиц в системе, 1/л;  $t$  – время, в течение которого происходит коагуляция, с;  $k$  – константа коагуляции, л/с. Константа коагуляции связана с коэффициентом диффузии частиц следующей формулой:  $k = 4\pi D l$ , где  $D$  – коэффициент диффузии частиц, м<sup>2</sup>/с;  $l$  – расстояние, при сближении на которое частицы объединяются в агрегат, м.

Между константой  $k$  и *временем половинной коагуляции*  $\tau_{0,5}$  (время, за которое число частиц в системе уменьшается в два раза) существует следующая зависимость:  $\tau_{0,5} = \frac{1}{k\nu_0}$ . С учетом времени половинной коагуляции основное

уравнение кинетики коагуляции Смолуховского примет вид:  $\nu = \frac{\nu_0}{1 + t/\tau_{0,5}}$ .

Анализ этого уравнения показал, что оно справедливо как для определения суммарной концентрации всех частиц, так и для частиц любого  $i$ -го порядка:

$$\nu_i = \frac{\nu_0 \left( \frac{t}{\tau_{0,5}} \right)^{i-1}}{\left( 1 + \frac{t}{\tau_{0,5}} \right)^{i+1}}.$$

Медленная коагуляция может быть объяснена неполной эффективностью столкновений. Вид коагуляции можно определить по величине константы коагуляции. Если теоретическое значение константы  $k_T = \frac{4RT}{3\eta N_A}$  больше экспериментально найденного значения, то происходит медленная коагуляция. Если  $k_T \approx k_{\text{эксп}}$ , то коагуляция быстрая.

### Задачи

1. Время половинной коагуляции золя иодида серебра при исходном содержании частиц  $3,2 \cdot 10^{11}$  л<sup>-1</sup> составляет 11,5 с. Определить константу скорости коагуляции. (*Ответ:*  $2,7 \cdot 10^{-13}$  л/с.)

2 Изучение быстрой коагуляции суспензии каолина, проводимое путем счета частиц с помощью ультрамикроскопа, дало следующие результаты:

t, сек	0	105	180	255
общее число частиц $10^{11}$ , л <sup>-1</sup>	5	3,9	3,18	2,92.

Рассчитайте время половинной коагуляции. (Ответ: 347 с.)

3 Быстрая коагуляция золя золота характеризуется следующими данными:

t, сек	0	30	60	120
общее число частиц $10^{11}$ , л <sup>-1</sup>	20,2	14,7	10,8	8,25.

Какое количество вторичных частиц окажется в системе через 240 с от начала коагуляции? (Ответ:  $8,9 \cdot 10^{10}$  л<sup>-1</sup>.)

4 Вычислить расстояние, при сближении на которое частицы объединяются в агрегат по следующим данным:  $T = 291$  К; вязкость среды 1,06 мПа•с; начальный радиус частиц  $9,6 \cdot 10^{-8}$  м:

t, сек	0	60	120	180
общее число частиц $10^{11}$ , л <sup>-1</sup>	5,22	4,35	3,63	3,38.

(Ответ:  $2,4 \cdot 10^{-7}$  м.)

5 Определить вид коагуляции (быстрая или медленная) путем сопоставления констант скорости коагуляции, полученных расчетным и экспериментальным путем, для золя серы, коагулируемого раствором хлорида аммония при 293 К.

t, сек	0	1	4	10
общее число частиц $10^{14}$ , л <sup>-1</sup>	16,0	1,78	0,50	0,20.

(Ответ: быстрая.)

6 Пороги коагуляции электролитов для некоторого гидрозоль равны (в моль/л): для  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  – 0,3; для  $\text{MgCl}_2$  – 0,025; для  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – 0,295; для  $\text{AlCl}_3$  – 0,0005. Какой заряд имеют частицы?

7 Золь иодида серебра получен смешением равных объемов растворов иодида калия и нитрата серебра. Пороги коагуляции различных электролитов для данного золя имеют следующие значения (ммоль/л):

$C(\text{Ca}(\text{NO}_3)_2) = 315$ ;  $C(\text{CaCl}_2) = 300$ ;  $C(\text{MgCl}_2) = 320$ ;

$C(\text{Na}_3\text{PO}_4) = 0,6$ ;       $C(\text{K}_2\text{SO}_4) = 20$ ;       $C(\text{Al}(\text{NO}_3)_3) = 330$ .

Какой из электролитов: KI или  $\text{AgNO}_3$  был взят в большей концентрации для приготовления золя? Дайте обоснованный ответ.

8 Получены два золя иодида серебра: один из них приливанием 16 мл 0,05 М раствора  $\text{AgNO}_3$  к 20 мл 0,03 М KI, другой – приливанием 12 мл раствора  $\text{AgNO}_3$  к 22 мл раствора KI тех же концентраций. Будут ли наблюдаться какие-либо явления при сливании их в общий сосуд?

9 Золь  $\text{AgBr}$  получен реакцией двойного обмена: 16 мл 0,005 М раствора  $\text{AgNO}_3$  и 40 мл 0,0025 М раствора  $\text{KBr}$ . Какой из электролитов будет иметь больший и меньший пороги коагуляции для полученного золя:  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ;  $\text{MgSO}_4$ ;  $\text{K}_3\text{PO}_4$ ?

10 Пороги коагуляции золя  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  для электролитов KI и  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  соответственно равны 10,0 и 0,195 ммоль/л. Во сколько раз коагулирующая способность дихромата калия больше, чем у йодида калия? (*Ответ: 51 раз.*)

11 Для коагуляции 10 мл золя  $\text{AgI}$  требуется 0,05 мл 0,4 М раствора  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  или 0,2 мл 0,03 М раствора  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ , или 1,5 мл 1 М раствора  $\text{KNO}_3$ . Определите пороги коагуляции электролитов и проверьте выполняемость правила Шульце – Гарди. (*Ответ: 1:63:208.*)

12 Как изменится порог коагуляции, если для коагуляции 10 мл золя сульфида мышьяка вместо 1,2 мл 0,5 М раствора NaCl взять 0,036 М раствор  $\text{MgCl}_2$  (его потребуется 0,4 мл) или 0,01 М раствор  $\text{AlCl}_3$  (которого потребуется 0,1 мл)? Проверьте выполнение правила Шульце – Гарди. (*Ответ: 1:41:571.*)

### **Вопросы и задачи для самостоятельного решения**

1 Что такое устойчивость и в чем особенность седиментационной и агрегативной устойчивости дисперсных систем?

2 Приведите примеры устойчивости и разрушения дисперсных систем применительно к различным областям промышленности.



3 Что следует понимать под термином агрегативная устойчивость? Как связаны между собой агрегативная устойчивость и  $\zeta$ -потенциал?

4 Что такое коагуляция? Какие причины могут вызывать коагуляцию золей?

5 В чем особенности коагуляции в результате: а) механического воздействия; б) под влиянием электрического поля; в) при изменении концентрации частиц золя; г) при нагревании; д) при охлаждении? Приведите примеры.

6 Приведите основные положения теории устойчивости гидрофобных золей Дерягина – Ландау – Фервея – Овербека (ДЛФО).

7 Что такое расклинивающее давление? Каков его физический смысл?

8 Какие варианты поведения коллоидной системы возможны в зависимости от соотношения величины потенциального барьера, глубины потенциальных ям и кинетической энергии частиц дисперсной фазы?

9 Какими способами осуществляется очистка воды и воздуха от дисперсных частиц и каково значение этих способов для охраны окружающей среды?

10 Время половинной коагуляции золя золота в воде при действии хлорида натрия составляет 20 секунд. Определите время, за которое число частиц золя уменьшится в 10 раз. Для расчета используйте теоретическое значение константы коагуляции, вязкость воды  $10^{-3}$  Па·с, температура 300 К.

(Ответ: 180 с.)

11 Константа скорости коагуляции золя  $5 \cdot 10^{-15}$  л/с. Начальная концентрация золя составляет  $3 \cdot 10^{11}$  л<sup>-1</sup>. Определите концентрацию золя через 30 мин.

(Ответ:  $8 \cdot 10^{10}$  л/с.)

12 Быстрая коагуляция золя серебра характеризуется следующими данными:

время, с	0	60	120	180
число частиц $10^{11}$ , л <sup>-1</sup>	20,22	11,00	7,92	6,30.

Какое количество частиц окажется в системе через 420 секунд от начала коагуляции? (Ответ:  $3,1 \cdot 10^{11}$  л<sup>-1</sup>.)

13 Золь  $\text{BaSO}_4$  получен реакцией двойного обмена сливанием 16 мл 0,005 М раствора  $\text{BaCl}_2$  и 25 мл 0,003 М раствора  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . Составьте формулу мицеллы и определите, какой из электролитов:  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  будет иметь больший и меньший пороги коагуляции.

14 Золь сульфида серебра получен реакцией двойного обмена 20 мл 0,0015М раствора  $\text{AgNO}_3$  и 15 мл 0,002 М раствора  $\text{Na}_2\text{S}$ . Составьте формулу мицеллы и расположите электролиты в порядке уменьшения их коагулирующей способности:  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ;  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ;  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ;  $\text{CaCl}_2$ .

15 Коагуляция 30 мл золя  $\text{AgI}$  наблюдается при добавлении к нему 30 мл электролита  $\text{KNO}_3$  концентрации 1 моль/л. На основании теории ДЛФО определите концентрацию 1 мл электролита  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ , которая вызывает коагуляцию 10 мл данного золя. (*Ответ:*  $7,2 \cdot 10^{-3}$  моль/л.)

16 Какой объем раствора  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  концентрации 0,05 моль/л потребуется для коагуляции 1 мл золя  $\text{AgI}$ ? Порог коагуляции электролита  $2 \cdot 10^{-3}$  моль/л. (*Ответ:* 0,042 мл.)

17 Как изменится величина порога коагуляции, если для коагуляции 10 мл золя  $\text{AgBr}$  вместо 1,5 мл 1 М  $\text{NaNO}_3$  взять 0,5 мл 0,1 М  $\text{CaCl}_2$  или 0,2 мл 0,01М  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ? Сопоставьте коагулирующие способности ионов. (*Ответ:* 1:27:662.)

18 Для коагуляции золя гидроксида железа (III) объемом 5 мл были добавлены растворы 1,05 мл 1М  $\text{KCl}$ ; 6,25 мл 0,005 М  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и 3,7 мл 0,0003М  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ . Определите пороги коагуляции электролитов и проверьте выполнимость правила Шульце – Гарди. (*Ответ:* 1:62:1351.)

## Тема № 5

### СВОЙСТВА ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

Коллоидные системы представляют собой вид дисперсных систем с высокой степенью дисперсности: размер коллоидных частиц лежит в интервале

от 1 мкм до 1 нм. Размер частиц дисперсной системы существенно влияет на ее свойства.

*Молекулярно-кинетические свойства* дисперсных систем характеризуются броуновским движением, диффузией и осмосом. Количественной мерой броуновского движения служит *средний сдвиг*  $\Delta x$  (м) – средняя квадратичная величина из проекций пути частицы на какую-либо ось за определенный промежуток времени. Величина  $\Delta x^2$  может быть точно вычислена на основании статистических законов по уравнению Эйнштейна – Смолуховского:

$$\Delta x^2 = \frac{RTt}{3\pi\eta r N_A},$$
 где  $t$  – время, с;  $\eta$  – вязкость среды или системы, Па•с;  $r$  – радиус

частиц дисперсной системы, м;  $N_A$  – число Авогадро.

Для описания диффузии используется первый закон Фика:  $m = -Dst \frac{dc}{dx}$ , где

$m$  – масса вещества, проходящего за время  $t$  через сечение площадью  $s$ ;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $dc/dx$  – градиент концентрации для одномерной диффузии. Для сферических частиц радиусом  $r$  коэффициент диффузии может

быть вычислен по уравнению Эйнштейна:  $D = \frac{RT}{6\pi\eta r N_A}$ .

В грубодисперсных системах частицы фазы постепенно оседают (всплывают) под действием силы тяжести. Этот процесс называется *седиментация* (sedimentum (лат.) – осадок). Процесс седиментации характеризуется скоростью седиментации  $v = h/t$ , где  $h$  – путь, пройденный частицей за время  $t$ . Скорость седиментации существенно зависит от размеров

частиц фазы:  $v = \frac{9\eta r^2}{2g(\rho - \rho_0)}$ , где  $r$  – радиус частиц фазы,  $g$  – ускорение силы

тяжести,  $\rho$  и  $\rho_0$  – плотности фазы и среды соответственно.

В коллоидных системах процесс оседания частиц компенсируется встречной диффузией. В результате устанавливается равновесие между направленным действием гравитационного поля и броуновским движением, которое характеризуется неоднородным распределением частиц по высоте

столба коллоидной системы. Это состояние называется *седиментационно-диффузионное равновесие*. Для описания процесса используют уравнение Лапласа – Перрена – Больцмана:  $\ln \frac{c_1}{c_2} = \frac{mg(h_2 - h_1)N_A(\rho - \rho_0)}{RT\rho}$ , где  $c_1$  и  $c_2$  – концентрация частиц на уровнях  $h_1$  и  $h_2$  соответственно,  $m$  – масса частицы, равная для сферических частиц  $\frac{4}{3}\pi r^3\rho$ .

Мерой *осмоса* является осмотическое давление, определяемое для идеальных растворов по закону Вант-Гоффа:  $\pi = cRT$ , где  $c$  – молярная концентрация, моль/м<sup>3</sup>. В дисперсных системах концентрацией следует считать число кинетических единиц, то есть частиц в единице объема, которое определяется *частичной (счетной) концентрацией*  $\nu$  (1/м<sup>3</sup>) или *грамм-частичной концентрацией*  $C_2$  (моль/м<sup>3</sup>):  $C_2 = \nu/N_A$ . Тогда *осмотическое давление* в коллоидных растворах можно рассчитать по одной из формул:  $\pi = C_2RT = \frac{\nu}{N_A}RT = \frac{CRT}{M}$ , где  $M$  – молярная масса коллоидной частицы или молекулы ВМС,  $C$  – весовая концентрация, г/м<sup>3</sup>.

Размерами частиц фазы определяются и *оптические свойства* дисперсных систем. Грубодисперсные системы преломляют и отражают свет и являются мутными. Для систем коллоидной дисперсности характерны явления *рассеяния (опалесценции)* и *поглощения (абсорбции)* света. Теория светорассеяния была развита Рэлеем. Он получил уравнение интенсивности рассеяния света  $I_p$  единицей объема коллоидной системы:

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

где  $I_0$  – интенсивность падающего света,  $V$  – объем частицы,  $\lambda$  – длина волны падающего света,  $n$  и  $n_0$  – показатели преломления фазы и среды соответственно. Уравнение справедливо для сферических частиц, не проводящих электрический ток, значительно меньших длины волны падающего света ( $0,1\lambda$ ) и находящихся на значительных расстояниях (вторичным рассеянием пренебрегают).

Некоторые золи способны поглощать свет определенной длины волны, о чем свидетельствует их окраска. При этом световая энергия превращается в тепло. Установлено, что поглощение монохроматического света золями подчиняется *закону Ламберта – Бера*:  $I_n = I_0 \exp[-(\varepsilon + K)cl]$ , где  $I_n$  – интенсивность прошедшего света,  $\varepsilon$  – коэффициент поглощения,  $K$  – коэффициент фиктивной абсорбции, обусловленной светорассеянием,  $c$  – концентрация золя,  $l$  – толщина поглощающего слоя золя (длина кюветы). Для оценки соотношения интенсивностей падающего и прошедшего через систему света часто пользуются уравнением:  $A = \lg(I_0/I_n) = 0,43\varepsilon a$ , где  $A$  – оптическая плотность или экстинкция,  $a$  – толщина светопропускающего слоя.

К *электрокинетическим свойствам* дисперсных систем относят электрофорез, электроосмос, потенциал течения и потенциал оседания (эффект Дорна); последнее практического применения пока не находит, хотя играет важную роль в природе и технике. Электрокинетические явления описываются *уравнением Гельмгольца – Смолуховского*:

- для *электрофореза*:  $u = \frac{E\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\varphi}$ , где  $u$  – скорость электрофореза, м/с;  $E$  – напряженность внешнего электрического поля, В/м;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума,  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $\zeta$  – электрокинетический потенциал, В;  $\varphi$  – коэффициент, зависящий от формы частиц (для сферических – 2,5, для вытянутых и ориентированных вдоль линий силового поля – 1). Для сравнения электропроводности дисперсных систем часто используют величину *электрофоретической подвижности*:  $u_E = u/E$ , м<sup>2</sup>/В•с.

- для *электроосмоса*:  $V = \frac{I\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\chi}$ , где  $V$  – объемная скорость, м<sup>3</sup>/с;  $I$  – сила тока, А;  $\chi$  – удельная электропроводность раствора, См/м.

- для *потенциала течения*:  $U_{теч} = \frac{P\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\chi\alpha}$ , где  $P$  – давление, вызывающее течение жидкости, Па;  $\alpha$  – коэффициент эффективности диафрагмы.

Вязкость жидкости или внутреннее трение можно характеризовать силой, которую необходимо приложить, чтобы сдвинуть два наложенных один на другой слоя жидкости. Эта сила пропорциональна площади трущихся друг о друга слоев жидкости, скорости их движения и обратно пропорциональна расстоянию между слоями (уравнение Ньютона):  $P = \eta S \frac{dU}{dx}$ , где  $\eta$  – коэффициент пропорциональности.

Если  $s = 1$  и  $dU/dx = 1$ , то  $P = \eta$  и называется *коэффициентом вязкости* (коэффициентом внутреннего трения, динамической вязкостью).  $[\eta]$  – Па•с; кг•с/м<sup>2</sup>; дин•с/см<sup>2</sup> (пуаз). Этот коэффициент зависит от природы жидкости и от ее температуры.

Вязкость данной жидкости влияет на время ее истечения через трубку малого диаметра (капилляр): чем больше вязкость данной жидкости, тем больше время ее истечения. В этом случае проявляется *кинематическая вязкость жидкости* – частное от деления динамической вязкости жидкости на ее плотность (м<sup>2</sup>/с, см<sup>2</sup>/с (стокс)).

Для расчета объема жидкости, вытекающей через капилляр, применимо *уравнение Пуазейля*:  $V = \frac{\pi r^4}{8l} \times \frac{P}{\eta}$ , где  $r$  и  $l$  – радиус и длина капилляра,  $P$  – суммарное давление,  $V$  – объемная скорость течения.

Вязкость растворов, содержащих макромолекулы, обычно выше вязкости растворов низкомолекулярных соединений и коллоидных растворов тех же концентраций.

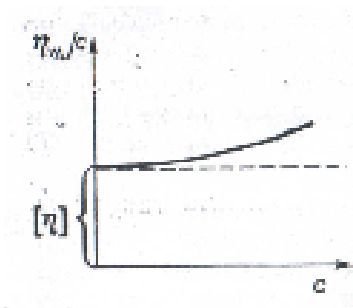


Рисунок 3 – Зависимость приведённой вязкости от концентрации ВМС в растворе

Для сильно разбавленных растворов полимеров, в которых молекулы не взаимодействуют между собой, *Штаудингер*, представлявший макромолекулы в растворе в виде жестких палочек, предложил следующую зависимость удельной вязкости  $\eta_{уд}$  от концентрации раствора полимера:  $\eta_{уд} = КМС$  ( $К$  – константа для каждого полимергомологического ряда,  $М$  – молекулярный вес растворенного полимера,  $С$  – весовая концентрация раствора).  $\eta_{уд}/С = КМ$  указывает на линейную зависимость между величиной  $\eta_{уд}/С$ , называемой *приведённой вязкостью*, и молекулярным весом полимера (рисунок 3). Отрезок, отсекаемый прямой  $\eta_{уд}/С = f(C)$  на оси  $\eta_{уд}/С$ , отвечает *характеристической вязкости*  $[\eta]$ , отражающей гидродинамическое сопротивление потоку молекул данного полимера. Характеристическая вязкость представляет собой приведённую вязкость при бесконечном разведении раствора. Связана с молярной массой полимера *уравнением Марка – Куна – Хаувинка*:  $[\eta] = kM^\alpha$ , где  $k$  – коэффициент, постоянный для растворов соединений полимергомологического ряда в данном растворителе,  $\alpha$  – величина, характеризующая форму макромолекул в растворе и связанная с гибкостью цепей.

### Задачи

- 1 Определить средний сдвиг капле эмульсии радиусом 10 нм за 4 с при 293 К и вязкости среды  $10^{-3}$  Па·с. (*Ответ*:  $1,3 \cdot 10^{-5}$  м.)
- 2 Мыло образует в воде мицеллы, радиус которых равен 12,5 нм. Определить коэффициент диффузии мицелл при 313 К, если вязкость раствора равна  $6,5 \cdot 10^{-4}$  Па·с. (*Ответ*:  $2,8 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с.)
- 3 Во сколько раз осмотическое давление раствора сока сахарной свеклы, молекулы которого имеют диаметр 0,8 нм, превышает осмотическое давление коллоидного раствора свекольного сока с диаметром частиц 80 нм? Концентрацию и плотности растворов считать одинаковыми. (*Ответ*:  $10^6$ .)

- 4 Определить осмотическое давление пыли при 293 К, если ее концентрация  $1,5 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>, средний радиус частиц 40 мкм, плотность  $1,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. (*Ответ:*  $1,73 \cdot 10^{-13}$  Па.)
- 5 Определить скорость оседания частиц радиусом 10 мкм, образующихся после помола зерен кофе в воде (вязкость  $10^{-3}$  Па·с) и в воздухе (вязкость  $1,81 \cdot 10^{-7}$  Па·с); плотность кофе 1,1 г/см<sup>3</sup>; воды и воздуха при температуре 293 К 1 и  $1,205 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup> соответственно. (*Ответ:*  $4,6 \cdot 10^{-16}$  и  $7,56 \cdot 10^{-21}$  м/с.)
- 6 Используя уравнение Лапласа – Перрена – Больцмана, вычислить высоту над поверхностью, на которой число частиц аэрозоля угольного дыма будет уменьшаться в 2 раза, если радиус сферических частиц  $10^{-8}$  м, плотность фазы 1,2 г/см<sup>3</sup>, температура 293 К. Плотностью среды можно пренебречь. (*Ответ:* 5,7 см.)
- 7 Как изменится интенсивность рассеянного света при увеличении размеров частиц с 20 до 80 нм, если концентрация и плотность материала, а также интенсивность падающего света остались постоянными? (*Ответ:* 4096 раз.)
- 8 Определить коэффициент поглощения, если поток света после прохождения дисперсной системы, толщина которой 3,1 см, ослабевает в 2,7 раза. (*Ответ:*  $0,32$  см<sup>-1</sup>.)
- 9 При исследовании аэрозолей методом поточной ультрамикроскопии в объеме золя  $1,33 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>, прошедшем через счетное поле микроскопа, подсчитано 50 частиц масляного тумана. Определить средний радиус частиц золя, если весовая концентрация золя  $25 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>, а плотность фазы 900 кг/м<sup>3</sup>. (*Ответ:*  $1,2 \cdot 10^{-7}$  м.)
- 10 С помощью метода поточной микроскопии в объеме  $2 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup> подсчитано 80 частиц аэрозоля – дыма мартеновских печей. Концентрация золя  $10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup>, плотность фазы 2 г/см<sup>3</sup>. Определить размер частиц, считая их форму кубической. (*Ответ:*  $2,3 \cdot 10^{-7}$  м.)



11 Электрокинетический потенциал высокодисперсных частиц золь апельсинового сока равен 50 мВ. Определить скорость электрофореза и электрофоретическую подвижность частиц золь сферической формы, если относительная диэлектрическая проницаемость среды равна 54,8; внешняя ЭДС 120 В; расстояние между электродами 40 см, вязкость среды  $4,5 \cdot 10^{-3}$  Па·с. (Ответ:  $6,5 \cdot 10^{-7}$  м/с,  $2,2 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/В·с.)

12 Найти значение потенциала течения, если через мембрану продавливается раствор спирта при следующих условиях: давление 20 МПа, удельная электропроводность раствора  $1,3 \cdot 10^{-3}$  См·м<sup>-1</sup>; относительная диэлектрическая проницаемость 41,3; вязкость 0,9 мПа·с, электрокинетический потенциал 6 мВ. (Ответ: 37,5 В.)

13 Рассчитать потенциал течения через кварцевую диафрагму в растворе NaCl, если известно, что скорость электрофореза частиц кварца, образующих диафрагму, в том же растворе равна  $8 \cdot 10^{-6}$  м/с; напряженность внешнего электрического поля 350 В/м; приложенное давление 3500 Па, удельная электропроводимость  $1,8 \cdot 10^{-2}$  См·м<sup>-1</sup>, коэффициент эффективности диафрагмы 1,2. (Ответ: 3,7 мВ.)

14 Определить электрокинетический потенциал частиц гидрозоля, если скорость электрофореза равна  $14,72 \cdot 10^{-4}$  см/с, градиент внешнего поля 3,19 В/см, диэлектрическая проницаемость воды 81,1, температура 18<sup>0</sup>С, вязкость воды при данной температуре 0,01 пуаз. Частицы имеют цилиндрическую форму. (Ответ: 64 мВ.)

15 Напишите схемы строения мицеллы иодида серебра, полученного при взаимодействии:

а) нитрата серебра с избытком иодида калия;

б) иодида калия с избытком нитрата серебра.

16 Составьте схему строения мицеллы золь гидроксида железа (III), полученного при неполном гидролизе хлорида железа (III).

17 Напишите схему строения мицеллы карбоната кальция, полученного при взаимодействии 20 мл 0,005 М раствора нитрата кальция с 25 мл 0,002 М раствора карбоната натрия.

18 Напишите схему строения мицеллы золя кремниевой кислоты, полученного при взаимодействии 10 мл раствора силиката натрия с 10 мл раствора соляной кислоты равной молярной концентрации.

19 Определите характеристическую вязкость раствора полиглюкина, используемого для получения кровезаменителя, если средняя молекулярная масса его равна  $2,5 \cdot 10^5$ . Константы в уравнении Марка – Куна – Хаувинка равны:  $K = 1,73 \cdot 10^{-5}$ ,  $\alpha = 0,49$ . (Ответ:  $7,73 \cdot 10^{-3}$ .)

20 Время истечения жидкости из капилляра вискозиметра 100 с. Объем жидкости, вытекающей из капилляра, равен  $1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ , длина капилляра 0,2 м. Жидкость с вязкостью  $1 \cdot 10^{-3} \text{ н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$  протекает под действием собственного веса, причем разность уровней жидкости в коленах прибора равна 0,27 м, а плотность жидкости  $10^3 \text{ кг} / \text{м}^3$ . Рассчитать радиус капилляра.

(Ответ:  $3,83 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ )

### Вопросы и задачи для самостоятельного решения

1 В чем причина молекулярно-кинетических явлений и почему они распространяются преимущественно на коллоидные системы, а не на все дисперсные системы?

2 Укажите причины броуновского движения. Как определить средний геометрический сдвиг частиц?

3 Определите причины и виды диффузии. Приведите примеры диффузии.

4 Что такое осмос, его причины и следствия? Как зависит осмотическое давление от размеров частиц дисперсной фазы коллоидных растворов?

5 На основе уравнения Рэлея объясните голубую окраску неба.

6 Почему для светомаскировки применяют синий свет, а для сигнализации в тумане – красный?

- 7 Какое строение имеет двойной электрический слой мицеллы?
- 8 Какое явление называют электрофорезом, электроосмосом? Что такое потенциал течения, потенциал седиментации?
- 9 Напишите схемы строения мицелл сульфида цинка, образованного при взаимодействии:
- а) сульфида натрия с избытком сульфата цинка;
- б) хлорида цинка с избытком сульфида аммония.
- 10 Напишите схему строения мицеллы сульфата бария, полученного при взаимодействии 20 мл 0,01 М раствора хлорида бария с 15 мл 0,025 М сульфата натрия.
- 11 Чему равен электрокинетический потенциал при протекании 0,01 М раствора KCl через керамический фильтр под давлением  $3,1 \cdot 10^4$  Па и потенциале течения  $1,2 \cdot 10^{-2}$  В? При 298 К вязкость раствора  $8,94 \cdot 10^{-4}$  Па·с, удельная электропроводимость  $0,141$  См·м<sup>-1</sup>, относительная диэлектрическая проницаемость 78,5. (Ответ: 70 мВ.)
- 12 Определите электрокинетический потенциал коллоидного раствора сахарозы при градиенте внешнего электрического поля 400 В/м, относительной диэлектрической проницаемости 69,1; вязкости 2,5 мПа·с и скорости электрофореза 13,5 мкм/с. (Ответ: 0,138 В.)
- 13 Определить экстинкцию куска хлеба толщиной 12 мм, если коэффициент поглощения составляет  $270$  м<sup>-1</sup>. (Ответ: 1,39.)
- 14 Как изменится интенсивность рассеянного света, если фруктовый сок, являющийся дисперсной системой, подвергнуть воздействию света длиной волны 430 нм и 680 нм? (Ответ: в 6,6 раз.)
- 15 Определить размеры частиц яичного альбумина, находящихся в воде при 293 К, если коэффициент диффузии  $7,8 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с, а вязкость воды  $10^{-3}$  Па·с. (Ответ:  $2,75 \cdot 10^{-9}$  м.)
- 16 Рассчитать средний сдвиг сферических частиц оксида алюминия и скорость их седиментации в воде при температуре 293 К, вязкости среды

$10^{-3}$  Па·с, плотности фазы  $3,9 \text{ г/см}^3$ , если радиус частиц 10 мкм. Сравнить седиментационную устойчивость дисперсных систем с размерами частиц 10 мкм и 10 нм. (Ответ:  $2,07 \cdot 10^{-7}$  м,  $1,58 \cdot 10^{-19}$  и  $10^{-25}$  м/с.)

17 Вычислить концентрацию частиц дыма на высоте 1 м, если на исходном уровне их концентрация  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ , средний радиус частиц  $10^{-8}$  м, плотность фазы  $1,2 \text{ г/см}^3$ , температура 290 К. Плотностью среды пренебречь. (Ответ:  $7,5 \cdot 10^{-9} \text{ кг/м}^3$ .)

18 Чему равна вязкость водного раствора поливинилового спирта, применяемого в качестве кровезаменителя, если он вытекает из капилляра со скоростью  $2,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ , при разности давлений на концах капилляра  $150 \text{ н/м}^2$ . Длина капилляра  $6 \cdot 10^{-2}$  м, радиус  $1,5 \cdot 10^{-4}$  м. (Ответ:  $2,16 \cdot 10^{-9}$  Па·с.)

19 Время вытекания из вискозиметра раствора поливинилового спирта с массовой долей 1,5% и плотностью  $1,1 \text{ г/см}^3$  в 2 раза больше, чем у воды (температура  $20^\circ\text{C}$ ). Рассчитайте относительную, удельную и приведенную вязкости этого раствора. (Ответ: 0,134 Па·с.)

20 Рассчитайте молекулярную массу полистирола, если относительная вязкость его раствора в толуоле с  $\omega = 0,1\%$  равна 1,1. Константа Штаудингера  $K = 1,3 \cdot 10^{-4}$ . (Ответ:  $4,9 \cdot 10^6 \text{ г/моль}$ .)

## Тема № 6

### КОЛЛОКВИУМ

#### **Молекулярно-кинетические, оптические и электрические свойства дисперсных систем. Устойчивость и коагуляция дисперсных систем**

#### **Вопросы к коллоквиуму**

- 1 Теория броуновского движения Эйнштейна – Смолуховского. Экспериментальная проверка теории.
- 2 Диффузия в коллоидных системах. Уравнение Эйнштейна.

- 3 Осмотические явления в коллоидных системах, их особенности. Роль осмоса в биологических процессах.
- 4 Седиментация в дисперсных системах. Уравнение Одена.
- 5 Седиментационно-диффузионное равновесие. Уравнение Перрена–Больцмана. Время установления равновесия.
- 6 Седиментационный анализ суспензий и эмульсий. Применение центрифуги и ультрацентрифуги.
- 7 Рассеяние и поляризация света в коллоидных системах. Закон Рэлея и условия его применимости.
- 8 Поглощение света золями. Применение закона Ламберта – Бэра к мутным средам. Окраска коллоидных систем. Окрашенные коллоиды в природе и технике.
- 9 Оптические методы исследования дисперсных систем.
- 10 Теории строения двойного электрического слоя на границе раздела фаз.
- 11 Влияние различных факторов на дзета-потенциал (температура, концентрация, электролиты). Перезарядка поверхности. Изоэлектрическое состояние.
- 12 Электрокинетические явления. Уравнение Гельмгольца – Смолуховского. Особенности электрических свойств поверхности в тонкопористых системах.
- 13 Практическое приложение электрокинетических явлений.
- 14 Виды устойчивости дисперсных систем (термодинамическая, агрегативная, седиментационная).
- 15 Расклинивающее давление по Дерягину. Молекулярная и электростатическая составляющие расклинивающего давления.
- 16 Термодинамические и кинетические факторы устойчивости дисперсных систем.
- 17 Теория устойчивости ДЛФО. Потенциальные кривые.
- 18 Кинетика быстрой и медленной коагуляции.

19 Правило Шульце – Гарди. Зоны устойчивости при перезарядке коллоидных частиц. Гетерокоагуляция (взаимная коагуляция, адагуляция). Коагуляция смесью электролитов. Флокуляция зелей полиэлектролитами.

20 Устойчивость и коагуляция зелей и суспензий в технологических процессах, в природе, использование в процессах водоочистки.

### **Темы докладов и презентаций**

- ***Эмульсии***

- 1 Классификация и свойства эмульсий.
- 2 Получение и разрушение эмульсий. Устойчивость эмульсии, обращение фаз.
- 3 Применение эмульсий. Промышленные эмульсии. Охрана водоемов и почв от нефтяных эмульсий.

- ***Пены***

- 1 Свойства и особенности пен. Кратность пен.
- 2 Устойчивость пен. Получение и применение пен.
- 3 Разрушение пен в технологических процессах и в природе. Охрана водоемов.

- ***Аэрозоли***

- 1 Классификация аэрозолей.
- 2 Получение и значение аэрозолей.
- 3 Свойства аэрозолей. Взрывы пыли.
- 4 Сыпучие материалы (порошки).

- ***Охрана окружающей среды***

- 1 Химия загрязнений атмосферы (токсический смог, фотохимический смог, кислотные дожди, другие токсиканты).
- 2 Разрушение озонового слоя.
- 3 Методы разрушения аэрозолей.
- 4 Методы защиты атмосферы от промышленных аэрозолей.

- 5 Загрязнение гидросферы. Общие показатели, характеризующие природные и сточные воды.
- 6 Методы очистки гидросферы (механические, химические).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### *Основная*

- 1 Щукин Е. Д., Перцов А. В., Амелина Е. А. Коллоидная химия. М. : Высшая школа, 2004. 445 с.
- 2 Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии. СПб. : Химия, 1995. 350 с.
- 3 Воюцкий С. С. Курс коллоидной химии. М. : Химия, 1975. 512 с.
- 4 Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. М. : Химия, 1982. 400 с.
- 5 Шелудко А. Д. Коллоидная химия. М. : Мир, 1984. 319 с.

### *Дополнительная*

- 1 Слесарев В. И. Химия: основы химии живого. СПб. : Химиздат, 2000. 768 с.
- 2 Фенелонов В. Б. Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. 442 с.
- 3 Химическая энциклопедия. М. : Большая Российская энциклопедия. Т. 1-5, 1988-1998.
- 4 Зимон А. Д. Занимательная коллоидная химия. М. : РАДЕКОН. 1998. 193 с.
- 5 Зимон А. Д. Занимательная физическая химия. М. : ВЛАДМО. 1998. 176 с.
- 6 Абрамсон А. А. Поверхностно-активные вещества. Л. : Химия, 1975. 246 с.
- 7 Мителл К. Мицеллообразование, солюбилизация и микроэмульсии / пер. с англ.; под ред. В. Н. Измайловой. М. : Мир. 1980. 597 с.
- 8 Зимон А. Д. Аэрозоли. М. : Химия, 1993. 202 с.
- 9 Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М. : Мир, 1979. 567 с.
- 10 Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах: коллоидная химия. М. : Химия, 1978. 368 с.



- 11 Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах: физико-химическая механика. М. : Химия, 1979. 381 с.
- 12 Шелудко А. Коллоидная химия. М. : Химия, 1960. 332 с.
- 13 Зонтаг Г., Штрэнге К. Коагуляция и устойчивость дисперсных систем. Л. : Химия, 1973. 149 с.
- 14 Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М. : Химия, 1976. 230 с.
- 15 Измайлова В. Н., Ребиндер П. А. Структурообразование в белковых системах. М. : Химия, 1974. 174 с.
- 16 Григоров О. Н. Электрокинетические явления. Л. : Химия, 1973. 198 с.
- 17 Шварц А., Перри Дж., Берч Дж. Поверхностно-активные вещества и моющие средства. М. : Мир, 1960. 555 с.

#### *Методическая*

- 1 Расчеты и задачи по коллоидной химии / под ред. В. И. Барановой. М. : Высшая школа, 1989. 288 с.
- 2 Практикум по коллоидной химии / под ред. И. С. Лаврова. М. : Высшая школа, 1983. 216 с.
- 3 Захарченко В. Н. Сборник задач и упражнений по физической и коллоидной химии. М. : Высшая школа, 1978. 175 с.

Рыкова Анна Ивановна

## КОЛЛОИДНАЯ ХИМИЯ

Методические указания

для подготовки к семинарским занятиям по коллоидной химии

для студентов направления 020201.65

«Фундаментальная и прикладная химия»

Редактор Г. В. Меньщикова

---

Подписано в печать 01.03.17	Формат 60*84 1/16	Бумага 65 г/м <sup>2</sup>
Печать цифровая	Усл .печ. л. 2,75	Уч.-изд. л. 2,75
Заказ №30	Тираж 20	Не для продажи

---

БИЦ Курганского государственного университета.

640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.

Курганский государственный университет.

---