

# КОЛЛОИДНАЯ ХИМИЯ

**Н. О. МЧЕДЛОВ-ПЕТРОСЯН**

Кафедра физической химии

# АГРЕГАТИВНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ И КОАГУЛЯЦИЯ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

## Устойчивость лиофобных дисперсных систем. Порог коагуляции электролитами

---

Особенности лиофобных дисперсных систем определяются тем, что они самопроизвольно не образуются при диспергировании ( $\Delta G_{дисп} > 0$ ) и являются термодинамически неустойчивыми. В этих системах, в отличие от лиофильных дисперсий, значительная избыточная энергия поверхности раздела фаз уже не компенсируется взаимодействием с растворителем. Поэтому для лиофобных систем проблема устойчивости представляется центральной.

Агрегативная устойчивость золей – устойчивость по отношению к слипанию частиц коллоидной системы в большие агрегаты.

Эффект Томсона–Кельвина в случае золей, образованных веществами с очень малой растворимостью, практически не проявляется.

Почти любое внешнее воздействие может вызывать коагуляцию гидрофобных систем:

как нагрев, так и охлаждение,  
электромагнитное облучение (в видимой, ультрафиолетовой и рентгеновской областях),  
механическое воздействие (перемешивание) и ультразвук,  
ионизирующее излучение,  
наложение электрического или магнитного полей,  
электрический ток,  
как концентрирование, так и разбавление,  
ультрафильтрация, прилипание коллоидных частиц к твердой поверхности (**адагуляция**, то есть коагуляция за счет адгезии),  
добавка органических растворителей.

Но особенно сильное влияние на процессы коагуляции проявляют электролиты.

Важнейшим признаком коагуляции золя под действием электролитов является ее **пороговый характер**.

В этом отличие коагуляции от явлений осаждения малорастворимых солеобразных соединений из истинного (не коллоидного) раствора.

Кроме того, коагуляцию, в отличие от осаждения, вызывают любые электролиты.

Коагуляция отличается и от высаливания лиофильных дисперсий, так как высаливание вызывается очень высокими концентрациями электролитов.

**Порог коагуляции  $Y$**  принято выражать в миллимолях электролита на 1 литр скоагулировавшего золя (ммоль/литр).

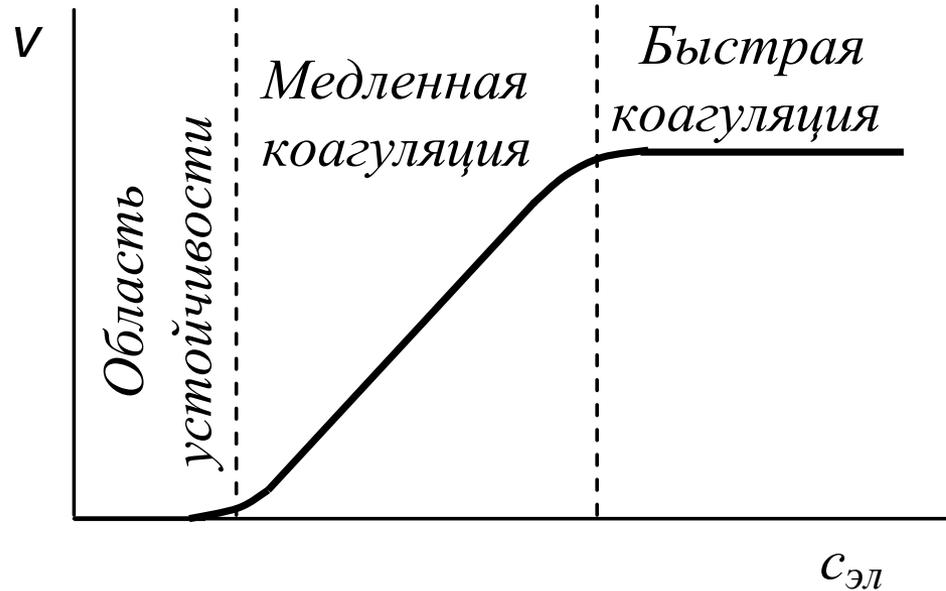
Иногда говорят о **коагулирующем действии**, характеристике, по своей величине обратной порогу коагуляции ( $Y^{-1}$ ).

Как проявляется коагуляция?

Следует иметь в виду, что процедура фиксации порога коагуляции содержит некоторую неопределенность и в известной мере носит субъективный характер.

Индукционный период коагуляции.

## Кинетика коагуляции



Быстрой коагуляцией принято называть такую коагуляцию, при которой все столкновения между частицами, происходящие в результате теплового движения, являются эффективными.

**Порог быстрой коагуляции (ПБК).**

Теория быстрой коагуляции была разработана М. Смолуховским (1917) для монодисперсных золь со сферическими частицами.

По Смолуховскому, коагуляция происходит в результате столкновения частиц при их броуновском движении..

Наиболее вероятным представляется столкновение двух частиц; одновременное столкновение трех или большего числа частиц менее вероятно, поэтому в теории и рассматриваются лишь двойные столкновения.

$$v = -dv/d\tau = kv_m v_n$$

$$-dv/d\tau = 8\pi D R v^2 = k v^2$$

$D$  – средний коэффициент диффузии,  $R$  – средний радиус частиц.

$$-\int_{v_0}^v \frac{dv}{v^2} = \int_0^{\tau} k d\tau$$

$$\frac{1}{v} - \frac{1}{v_0} = k\tau$$

уравнение Смолуховского



$$v = \frac{v_0}{1 + k v_0 \tau}$$

Время половинной коагуляции:  $k v_0 = 1/\theta$

$$v = \frac{v_0}{1 + \tau / \theta}$$

В действительности же при сближении между частицами начинают проявляться силы отталкивания — возникает потенциальный барьер.

Поэтому коагулировать могут только те частицы, которые имеют энергию, превышающую среднюю на некоторую величину  $U$ , достаточную для преодоления этого барьера, и эффективность соударений будет пропорциональна фактору Больцмана.

Кроме того, если частицы не сферические, то эффективность столкновений будет зависеть от взаимной пространственной ориентации частиц, их формы и размеров. Все это учитывается введением стерического множителя  $P$ , а уравнение записывается как

$$-dv/d\tau = 8\pi DRP \exp[-U/(k_B T)] v^2 = kv^2$$

В теории Фукса вводится понятие о *коэффициенте замедления коагуляции (коэффициенте стабильности)*  $W$  – отношение констант скоростей быстрой и медленной коагуляций:

$$W = \frac{k_{\text{быстр}}}{k_{\text{медл}}} = \frac{1}{P} \exp[U / (k_B T)]$$

При малых добавках электролитов ( $c \ll Y$ ) законам быстрой коагуляции гидрозоль не подчиняется, что может указывать на наличие каких-то стабилизирующих факторов: вероятность слипания уже меньше единицы.

Лишь когда “защитные ресурсы” исчерпаны, наступает быстрая коагуляция; до этого времени идет медленная коагуляция.

## **Закономерности коагуляции зольей электролитами. Правило Шульце–Гарди. Классические теории коагуляции**

---

Исследуя ионно-стабилизированные гидрозольи, Г. Шульце и У. Гарди (1882 – 1900), показали, что на коагуляцию зольей с положительным зарядом частицы основное влияние оказывает анион добавляемого электролита, а с отрицательным – катион.

Причем коагулирующее действие ( $Y^{-1}$ ) двухзарядных ионов обычно в десятки раз ( $f$  10 – 80), а трехзарядных – в сотни раз ( $f$  300 – 1500) выше, чем ионов однозарядных.



Hans Schulze



Sir William Bate Hardy



Относительное коагулирующее действие  $Y^{-1}$  катионов  
с зарядами  $z = 1, 2$  и  $3$

		$K^+$	$Ba^{2+}$	$Al^{3+}$
по С. Линдеру и М. Пиктону		1	83	1590
по Ф. Повису	1	40	267	
по Г. Фройндлиху		1	72	528

Классическое *правило Шульце–Гарди* в современной редакции звучит так:

коагулирующее действие проявляет главным образом ион, знак заряда которого противоположен знаку заряда гранулы, и коагулирующее действие растёт пропорционально некоторой высокой степени его заряда.

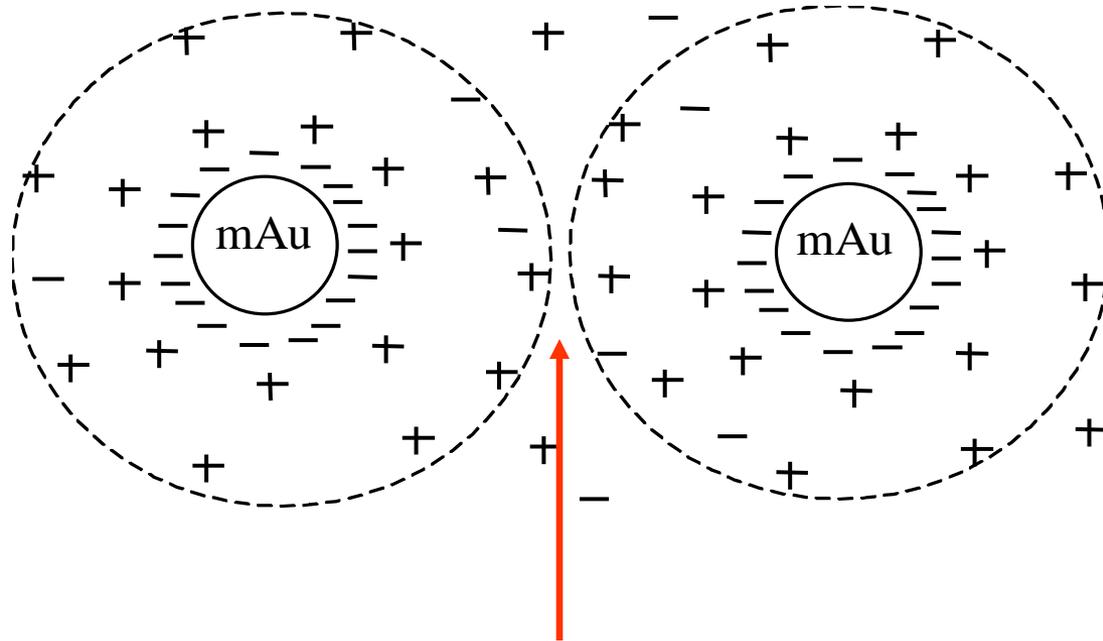
**Таблица 5.** Значения порогов быстрой коагуляции гидрозоля  $son/nC_{60}$  электролитами [38, 87, 94-96]<sup>a</sup>

Электролит	$z^{\circ}$	$10^3 Y, M, \pm (5-15\%)$	$Y (NaCl): Y (соли)$
NaCl	1	85 <sup>e</sup>	1
$\frac{1}{2} Na_2SO_4$	1	85	1
NH <sub>4</sub> Cl	1	80	1.06
KI	1	80	1.06
KOH	1	27.5	3.1
HNO <sub>3</sub>	1	1.2	71
HCl	1	0.88	97
HClO <sub>4</sub>	1	0.55	155
CaCl <sub>2</sub>	2	4.1	21
MgSO <sub>4</sub>	2	4.75	18
$\frac{1}{2} Fe_2(SO_4)_3$	3	0.05	$1.7 \times 10^3$
La(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	3	0.056	$1.5 \times 10^3$
Th(NO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>	4	0.027 <sup>с, d</sup>	$3.1 \times 10^3$
<i>n</i> -C <sub>5</sub> H <sub>11</sub> N(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>3</sub> HSO <sub>4</sub>	1	1.8	47
N( <i>n</i> -C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> ) <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub>	1	0.8	106
<i>n</i> -C <sub>12</sub> H <sub>25</sub> N(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> Br	1	0.032	$2.6 \times 10^3$
<i>n</i> -C <sub>16</sub> H <sub>33</sub> N(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> Br	1	0.0052 <sup>e</sup>	$1.6 \times 10^4$

**Примечания к табл. 5.**

<sup>a</sup> Концентрация фуллерена  $(0.98-1.10) \times 10^{-4}$  М (для предварительно не отфильтрованного золя значения порогов коагуляции в 1.5–1.7 раз ниже); <sup>b</sup> заряд катиона; <sup>c</sup> в присутствии  $6.4 \times 10^{-4}$  М додецилсульфата натрия  $Y = 0.322$  М; <sup>d</sup> 0.003 М HNO<sub>3</sub>; <sup>e</sup> сравнительно небольшое различие значений  $Y$  для  $z = 3$  и 4 может быть объяснено ассоциацией катиона тория (IV) с одним ионом нитрата; <sup>e</sup> концентрация фуллерена  $1.95 \times 10^{-4}$  М.

Почему электролиты вызывают коагуляцию?



Защитное действие диффузных слоёв

У. Гарди высказал предположение, что коагуляция коллоидов наступает, когда поверхность частиц становится незаряженной.

Позднее стали принимать, что дисперсная система становится неустойчивой еще до полной “разрядки”, и что порогу коагуляции золей отвечают значения  $|\zeta| \leq 30$  мВ (Ф. Повис).

Роль лиотропных рядов

Роль адсорбции ионов

$$A = A_{\infty} \frac{Kc}{1 + Kc}$$

$$K_i = \exp \left[ - \frac{z_i F \Psi_{\delta} + \Phi_i}{RT} \right]$$

Пороги коагуляции гидрозоль  $As_2S_3$  :

	$NH_4^+$	$N(C_2H_5)_4^+$
$Y$ (ммоль·дм <sup>-3</sup> )	51	0.155

На значение  $Y$  могут влиять и факторы, специфические для данного конкретного золя. Так, при коагуляции гидрозоль  $HgS$ , стабилизированного ионами  $S^{2-}$  и  $HS^-$ , значение  $Y$  для солей  $Tl^+$  и  $Cu^+$  в 90 – 200 раз меньше, чем для солей  $Na^+$ , и даже меньше, чем для солей  $Ba^{2+}$  и  $Sr^{2+}$ . Причина такого сильного влияния заключается в образовании нерастворимых сульфидов таллия и меди (I).

## Старые теории коагуляции

*Теория Дюкло* объясняла коагуляцию прохождением химических реакций на границе раздела фаз, которые приводят к “нейтрализации” поверхностного заряда.

Сюда же примыкала и *теория Паули*, которая рассматривала коллоидную частицу как большой комплексный ион.

*Теория Фройндлиха* как причину коагуляции рассматривала исключительно адсорбцию противоионов, которая ведет к снижению поверхностного заряда.

*Теория Мюллера*, напротив, не допускала адсорбции (что, однако, противоречит известным экспериментальным фактам), а учитывала лишь сжатие диффузной части ДЭС.

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 RT}{2F^2 I}}$$

***Теория Рабиновича и Каргина*** учитывает как адсорбцию ионов (**нейтрализационный механизм**), так и сжатие диффузной части ДЭС (**концентрационный механизм**), объединяя и существенно улучшая теории Фройндлиха и Мюллера.

А. И. Рабинович и В. А. Каргин показали значительное отличие изотерм адсорбции разных ионов, а также сложность процессов адсорбции на частицах золь; в частности, сначала она протекает по ионообменному механизму.

***Теория Во. Оствальда*** объясняла коагуляцию “вытеснением” дисперсной фазы за счет межионных сил притяжения – в дисперсионной среде происходит как бы “самоочистка” раствора электролита от посторонних частиц.

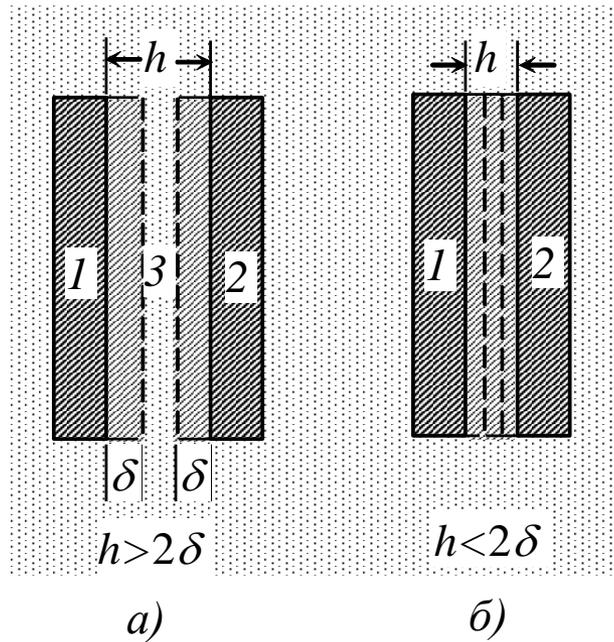
Общим недостатком классических теорий было то, что даже в наиболее завершенной форме они объясняли лишь причины преодоления сил отталкивания (которые имеют электрическую природу), и не рассматривали природу сил притяжения между частицами.

Эта проблема была решена Б. В. Дерягиным и другими авторами. При этом принципиально важным был сам подход к устойчивости, основанный на рассмотрении всех сил, которые действуют в тонкой прослойке раствора между двумя частицами.

## Теория ДЛФО

Б. В. Дерягин и другие авторы (1937 – 1948), основываясь на теории растворов, статистической физике и теории действия молекулярных сил, разработали подход к оценке энергии взаимодействия частиц дисперсной системы  $U$ , которая создает возможность теоретического анализа коагуляции.

Основной постулат этой теории, которая получила название *теории Дерягина–Ландау–Фервея–Овербека* (*теория ДЛФО*), – рассмотрение взаимодействия двух мицелл заменяется рассмотрением взаимодействия двух пластин, разделенных раствором электролита. При этом ключевым является введенное Дерягиным понятие о *расклинивающем давлении* (disjoining pressure).



$$dG = -s\Pi(h)dh,$$

$$\Pi(h) = p - p^{\circ} = \frac{1}{s} \left( \frac{\partial G}{\partial h} \right)_{T, s, n_i}$$

Здесь  $p$  и  $p^{\circ}$  — давление в прослойке и в жидкой фазе, равновесной с прослойкой.

$$\Delta G_S = \int_{h_1}^{h_2} \Pi(h) dh$$

По Дерягину, существуют следующие основные составляющие  $\Pi(h)$ :

**Электростатическая составляющая** (обусловленная ионно-электростатическими силами) дает положительный вклад в  $\Pi(h)$  при сближении одноименно заряженных частиц.

**Молекулярная составляющая** обусловлена ван-дер-ваальсовским притяжением. Показано, что главную роль играют дисперсионные взаимодействия.

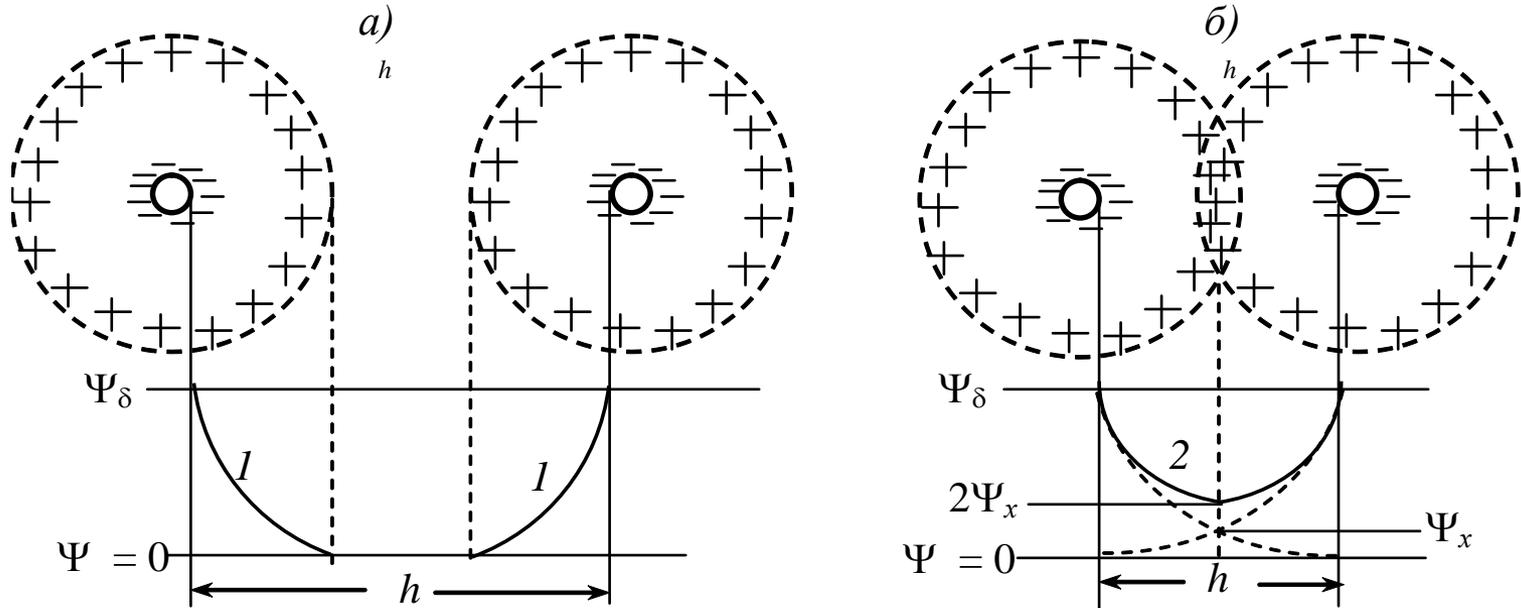
**Структурная составляющая** (обусловленная так называемыми структурными силами)

**Адсорбционная составляющая**

$$U = U_{\text{эл}} + U_M.$$

$$d\Pi_{\text{эл}} = \rho d\Psi,$$

$$\Psi_x = \Psi_\delta e^{-\kappa x},$$



$$\Pi_{\text{эл}} = \int_{2\Psi_x}^0 \rho d\Psi$$

$$d^2\Psi/dx^2 = -\rho/(\varepsilon_0\varepsilon_r), \quad d^2\Psi/dx^2 = \kappa^2\Psi,$$

Откуда

$$\rho = -\varepsilon_0\varepsilon_r\kappa^2\Psi.$$

$$x = h/2$$

$$\Pi_{el} = \int_0^{2\Psi_x} \varepsilon_0\varepsilon_r\kappa^2\Psi d\Psi = 2\varepsilon_0\varepsilon_r\kappa^2\Psi_x^2$$

$$\Pi_{el} = 2\varepsilon_0\varepsilon_r\kappa^2\Psi_\delta^2 e^{-\kappa h}$$

В случае высоких потенциалов теория ДЛФО дает уравнение:

$$\Pi_{\text{эл}} = 64c_0 RT \gamma^2 e^{-\kappa h},$$

где  $\gamma = \frac{\exp[zF\Psi_\delta / (2RT)] - 1}{\exp[zF\Psi_\delta / (2RT)] + 1}$

$$U_{\text{эл}} = \int_h^\infty \Pi_{\text{эл}} dh = \int_h^\infty 2\varepsilon_0 \varepsilon_r \kappa^2 \Psi_\delta^2 e^{-\kappa h} dh = -\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r \kappa^2 \Psi_\delta^2}{\kappa} \int_h^\infty e^{-\kappa h} d(-\kappa h)$$

Для малых потенциалов

$$U_{\text{эл}} = 2\varepsilon_0 \varepsilon_r \kappa \Psi_\delta^2 e^{-\kappa h}$$

Для высоких потенциалов

$$U_{\text{эл}} = \frac{64c_0 RT}{\kappa} \gamma^2 e^{-\kappa h}$$

## Молекулярная составляющая

$$U_m = -\frac{A_{12}}{12\pi h^2}$$

где  $A_{12}$  – так называемая постоянная Гамакера;  
она имеет величину порядка  $10^{-19}$  Дж.

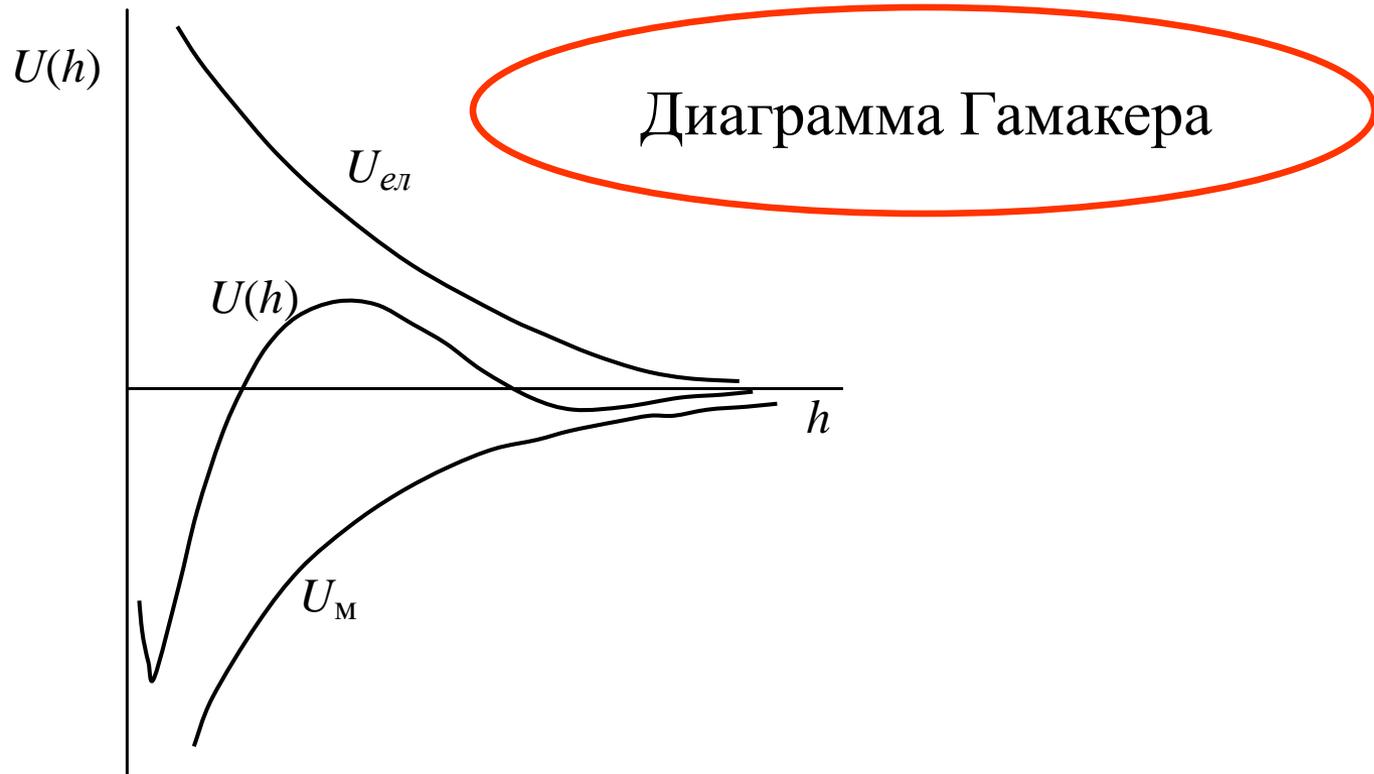
$$A^* = (\sqrt{A_{\phi\phi}} - \sqrt{A_{cc}})^2$$

$$U_m = -\frac{A^*}{12\pi h^2}$$

$$U(h) = U_{ел} + U_{м} = 2\varepsilon_0 \varepsilon_r \kappa \Psi_\delta^2 e^{-\kappa h} - \frac{A^*}{12\pi h^2}$$

ИЛИ:

$$U(h) = \frac{64c_0 RT}{\kappa} \gamma^2 e^{-\kappa h} - \frac{A^*}{12\pi h^2}$$



# Применение теории ДЛФО к трактовке коагуляции золь

Рассмотрение взаимодействия двух мицелл с позиций теории ДЛФО позволяет объяснить следующие явления:

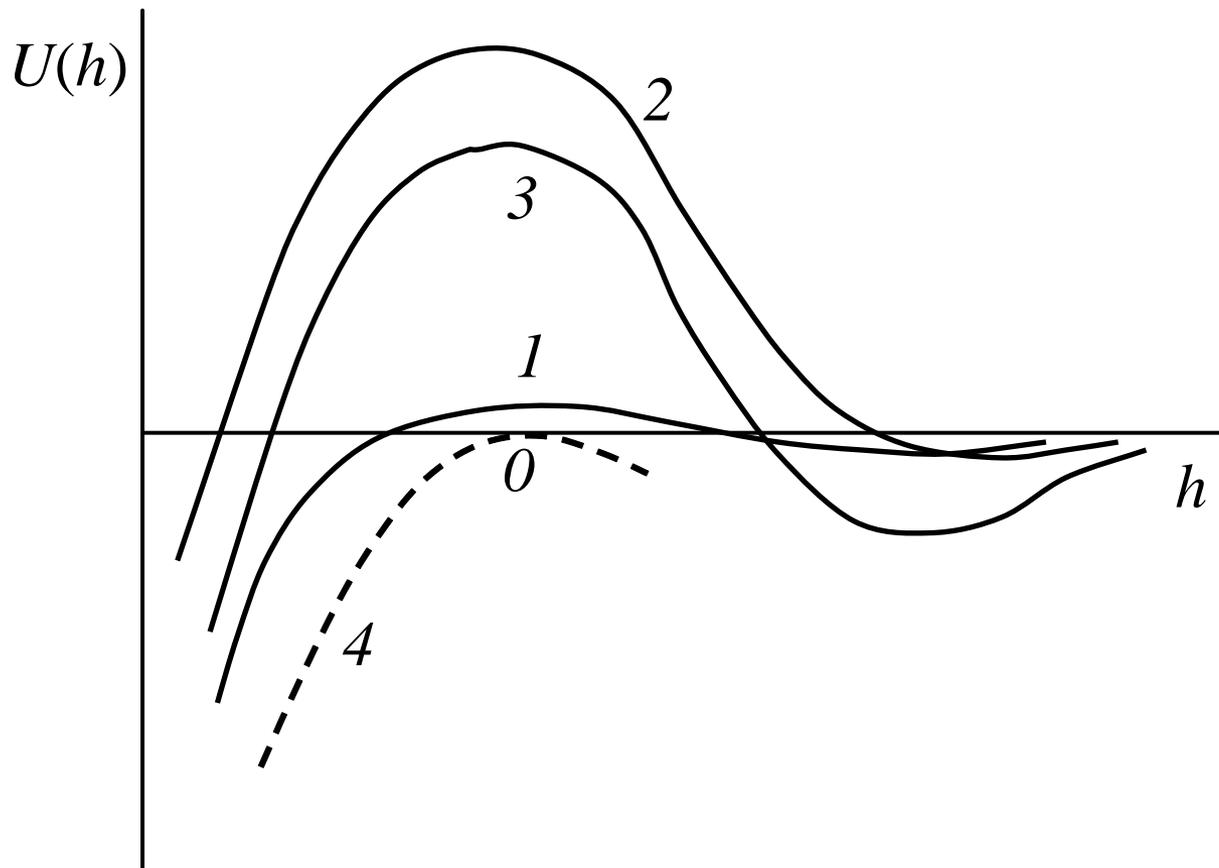
агрегативную устойчивость дисперсных систем;

концентрационную и нейтрализационную коагуляцию;

правило Шульце–Гарди;

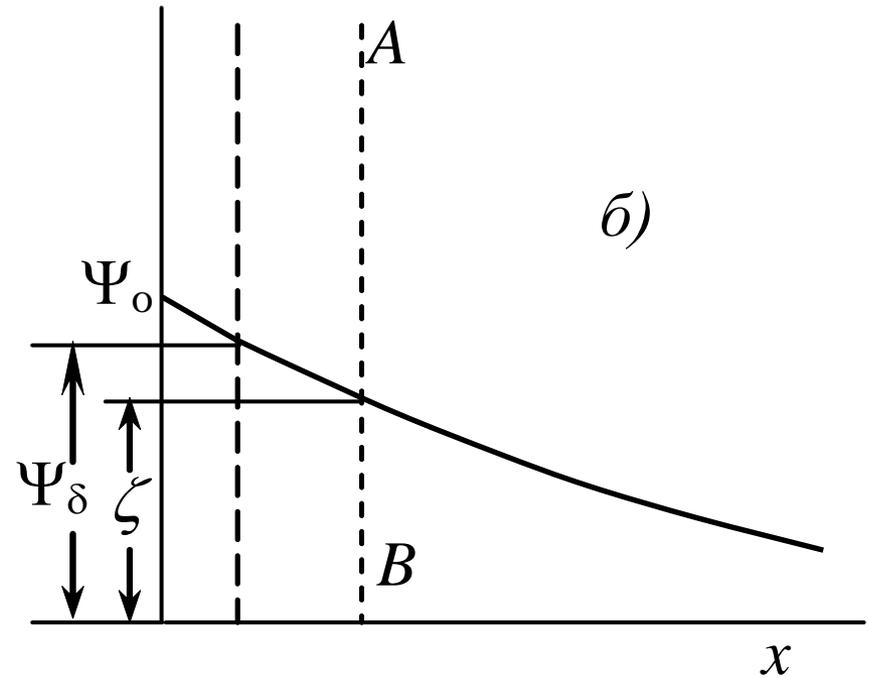
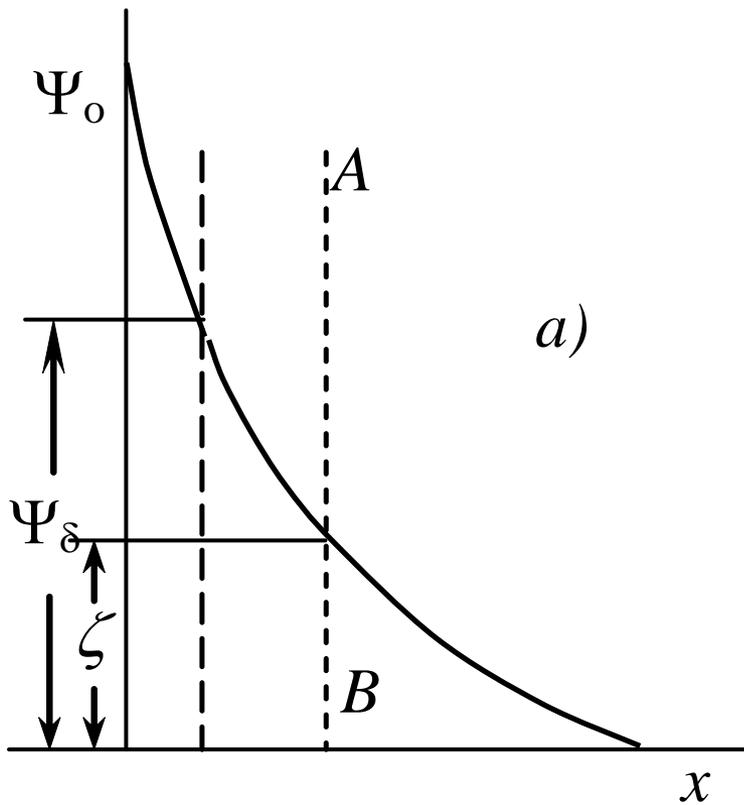
дальнее взаимодействие между коллоидными частицами и образование периодических коллоидных структур;

особое влияние ПАВ и красителей – учет, кроме адсорбции, еще и гидрофобности (структурная составляющая).



Разные типы потенциальных кривых взаимодействия мицелл  
(в зависимости от значений параметров  $c$ ,  $\kappa$ ,  $\Psi_\delta$ ,  $A^*$ )

Коагулирующее действие электролитов: воздействие на параметры системы по двум механизмам: концентрационному и нейтрализационному (либо по обоим механизмам)



Соотношение между  $\Psi_\delta$ - и  $\zeta$ -потенциалами:

для сильно заряженных частиц в достаточно концентрированном растворе электролита (а) и для слабо заряженных частиц в разбавленном растворе электролита (б)

# Концентрационная коагуляция

---

Быстрая коагуляция:

$$U_{\max} = 0 \quad \text{и} \quad dU/dh = 0.$$

При больших потенциалах это эквивалентно уравнению:

$$\frac{64c_0RT}{\kappa_{кр}} \gamma^2 e^{-\kappa_{кр}h_{кр}} = \frac{A^*}{12\pi h_{кр}^2}$$

$$(c_0 = \text{ПБК} = Y)$$

Дифференцируем по  $h$ :

$$\frac{64c_0RT}{\kappa_{кр}} \gamma^2 (-\kappa_{кр}) e^{-\kappa_{кр}h_{кр}} = -\frac{A^*}{6\pi h_{кр}^3}$$

Сочетая два предыдущих уравнения, имеем:  $\frac{\gamma^2}{\kappa_{кр}} = \frac{h_{кр}}{2}$

или:  $h_{кр} = 2\gamma^2 / \kappa_{кр}$

Подставляя это значение расстояния в первоначальное уравнение, имеем:

$$64c_0 R T e^{-2\gamma^2} = \frac{A^* \kappa_{кр}^3}{48\pi\gamma^6}$$

или:  $c_0 / \kappa_{кр}^3 = B$

А так как  $\kappa^2$  пропорционально  $c_0 z_i^2$ , то:

$$Y = B \frac{\varepsilon_r^3 (k_B T)^5}{A^{*2} e^2 z^6} = \frac{const}{z^6}$$

Следовательно, для ионов с зарядами  $z = 1, 2, 3$  и  $4$  соотношение значений  $Y^{-1} = 1 : 64 : 729 : 4096$ . Так эмпирическое правило Шульце–Гарди получает теоретическое обоснование.

Однако в ряде случаев наблюдается не такая резкая зависимость  $Y$  от заряда противоиона.

Так называемое **правило Эйлера–Корфа** предусматривает, что для некоторых систем порог коагуляции  $Y$  обратно пропорционален  $z^2$ .

Эта зависимость имеет место для слабо заряженных поверхностей, когда добавки электролитов снижают (по абсолютной величине) значения  $\Psi_\delta$  до некоторого критического значения, после чего энергетический барьер снижается, и наступает коагуляция.

Это происходит обычно за счет адсорбции, которая приводит к частичной нейтрализации поверхностного заряда.

# Нейтрализационная коагуляция

---

$$2\varepsilon_0\varepsilon_r\kappa_{кр}\Psi_\delta^2 e^{-\kappa_{кр}h_{кр}} = \frac{A^*}{12\pi h_{кр}^2}$$

$$2\varepsilon_0\varepsilon_r\kappa_{кр}\Psi_\delta^2 e^{-\kappa_{кр}h_{кр}} (-\kappa_{кр}) = -\frac{A^*}{6\pi h_{кр}^3}$$

Отсюда:  $h_{кр} = 2/\kappa_{кр}$

$$\frac{\varepsilon\Psi_\delta^2}{A^*\kappa_{кр}} = B' = const$$

Для слабо заряженных поверхностей потенциал  $\Psi_\delta$  мало отличается от  $\zeta$ -потенциала. Поэтому:

$$\frac{\varepsilon \zeta^2}{A^* \kappa_{кр}} = B'$$

(критерий Дерягина–Эйлерса–Корфа)

$$\zeta^2 / \kappa_{кр} \leq B$$

$$Y = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r RT \Psi_\delta^4}{B^2 F^2 e^2 z^2} = \text{const}' \frac{\Psi_\delta^4}{z^2}$$



**Борис Владимирович ДЕРЯГИН**  
**(1902-1994)**

## Дальнейшее развитие теории ДЛФО

---

Переход от пластин к частицам различной формы

В области малых электрических потенциалов (до 100 мВ) и на малых расстояниях  $h$  (до 50 нм) суммарная энергия взаимодействия между двумя сферическими частицами радиуса  $r$  рассчитывается по уравнению:

$$U = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r r\Psi_\delta^2 \ln(1 + e^{-\kappa h}) - \frac{A^* r}{12h}$$

Учёт электромагнитного запаздывания

Образование периодических коллоидных структур

Тактоиды

Взаимодействие трёх коллоидных частиц

Особенности коагуляции в полидисперсных системах

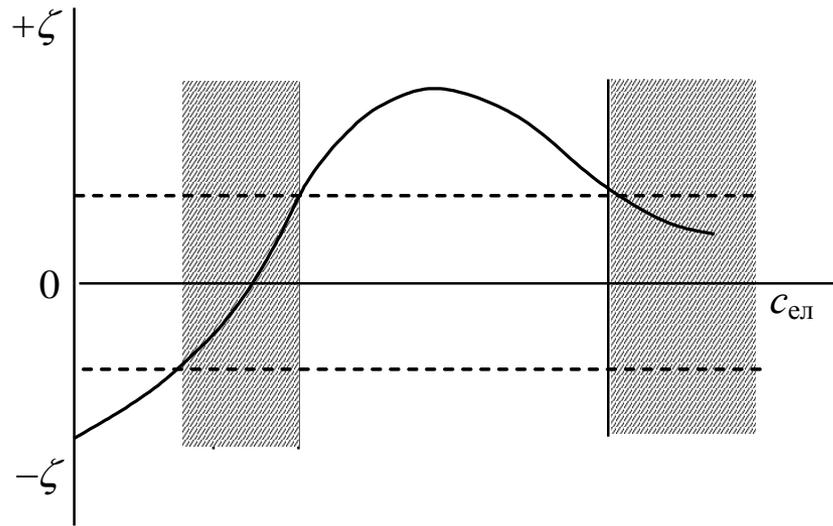
Влияние концентрации золя на ПБК

Теория В. Муллера

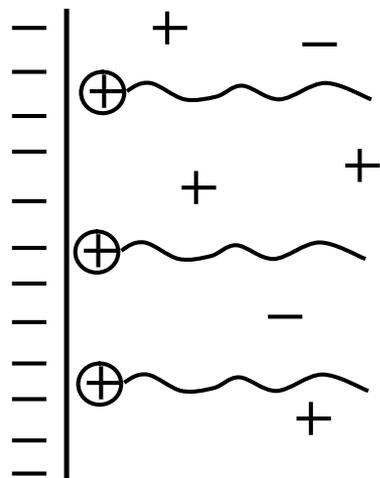
# Особые явления при коагуляции золей

---

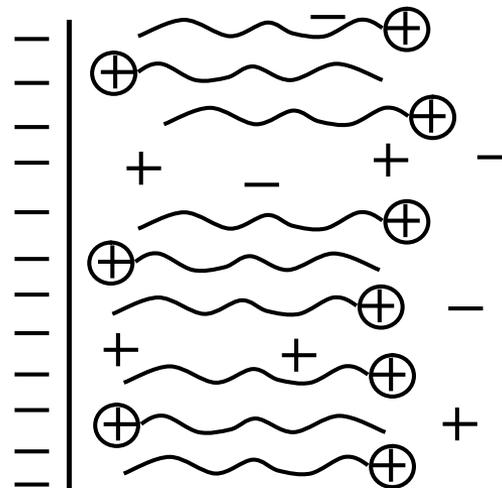
“Зоны коагуляции”, или “неправильные ряды”:



Изменение  $\zeta$ -потенциала гидрозольа Au при добавлении ионов  $\text{Al}^{3+}$



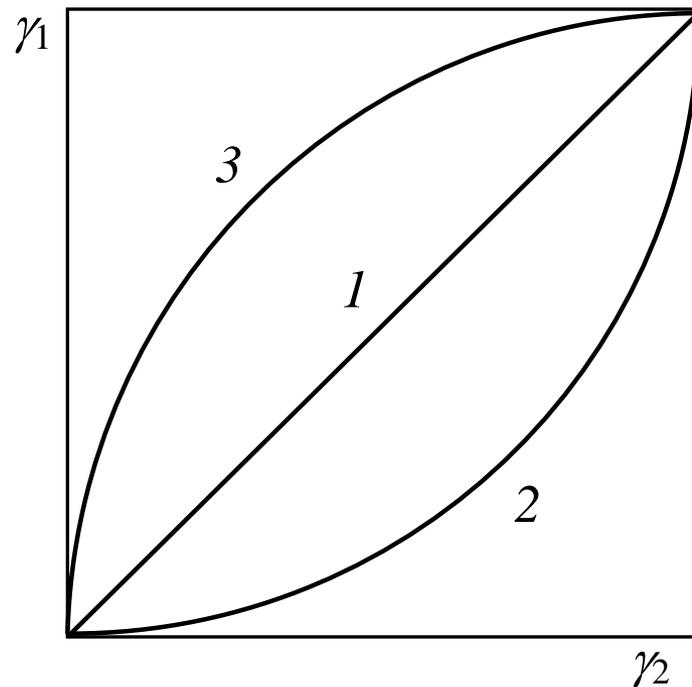
a)



b)

Разные варианты взаимодействия катионного ПАВ с поверхностью отрицательно заряженной коллоидной частицы

# Коагуляция смесью электролитов: аддитивное влияние, антагонизм, синергизм.



Аддитивное влияние (1), антагонизм (2) и синергизм (3)  
при коагулирующем действии электролитов

«Привыкание» зелей к электролитам.

«Отрицательное привыкание» - встречается гораздо чаще

Гетерокоагуляция — коагуляция, которая происходит при смешивании двух зелей с одинаковым знаком заряда частиц

Взаимная коагуляция — коагуляция, которая происходит при смешивании двух зелей с противоположным знаком заряда частиц

## **Факторы устойчивости и защита коллоидов. Флокуляция**

---

К термодинамическим факторам устойчивости относится уже рассмотренное выше электростатическое взаимодействие диффузных частей ДЭС одноименно заряженных коллоидных частиц. Кроме того, различают **адсорбционно-сольватный, структурно-механический** и **энтропийный** факторы устойчивости.

## **Адсорбционно-сольватный барьер.**

В случае некоторых зелей, например,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Mn}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  гидратные оболочки сильно развиты, и сближение, которое отвечает ближнему минимуму, вообще затруднено (“запрещено”). Коагуляция происходит в дальнем минимуме с образованием рыхлых структурированных агрегатов.

## **Энтропийный фактор.**

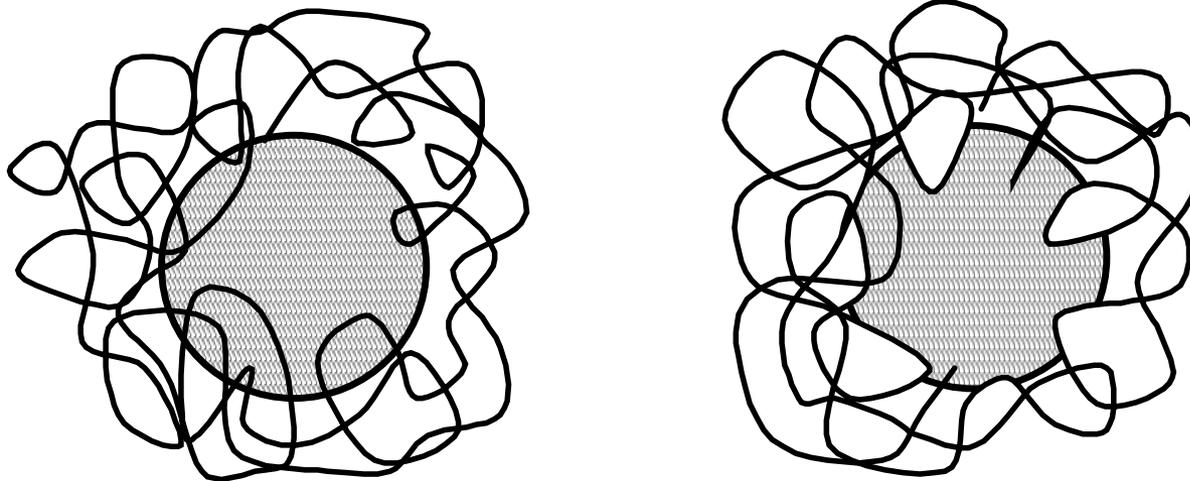
Отдаление коллоидных частиц, разделенных гидратной прослойкой, происходит частично и в результате диффузии, поскольку равномерное распределение частиц дисперсной фазы по всему объему коллоидной системы само по себе способствует росту энтропии ( $\Delta S > 0$ ).

**Структурно-механический барьер** относится к *кинетическим факторам*.

Он возникает, когда упругие и вязкие поверхностные слои не дают частицам гидрозоля за время столкновения выжаться из оболочек и соединиться.

ПАВ являются в этом смысле стабилизаторами, которые создают структурно-механический барьер

Действие всех факторов усиливается, когда сольватные слои увеличиваются в результате адсорбции длинноцепочечных ПАВ, особенно ВМС, и могут достигать огромных размеров (до десятков нанометров).



Частицы гидрозоля, защищенные оболочкой из ВМС

«Энтропийное отталкивание»

Осмос

## *«Защитные коллоиды»*

*Золотое число* – это минимальное количество белка или другого ВМС (в миллиграммах), которое предотвращает коагуляцию 10 мл 0.005%-ного красного гидрозоль золота (с превращением в синий золь), которое происходит при добавке 1 мл 10%-ного раствора NaCl.

Чем меньше золотое (или другое) число, тем выше эффективность стабилизации.

Флокуляция

## Обратимость коагуляции. Пептизация

Некоторые золи при коагуляции превращаются в гели или пасты, что можно рассматривать как способ получения связнодисперсных систем.

Иногда удастся опять превратить их в золи.



При попытке такого превращения заметно проявляется разная степень лиофилизации лиофобных систем.

Пептизация тем вероятнее, чем более лиофилизирован исходный золь, и чем меньше времени прошло с момента коагуляции, поскольку впоследствии при ближнем взаимодействии происходит срастание частиц с уменьшением поверхностной энергии.

Через значительный промежуток времени коагуляция становится необратимой: удаление растворителя превращает коагулят в твердую фазу.

Выбор способа пептизации зависит от того, чем была вызвана коагуляция. Выбирается способ, при котором возобновляется барьер до надлежащей высоты, что и приводит к пептизации – возвращению системы в состояние золя.

# Правило осадка Во. Оствальда

---

