

Physicochemistry of Interfacial
Phenomena Laboratory
INEOS RAS

Институт Элементоорганических Соединений
им.А.Н.Несмеянова (ИНЭОС РАН)

**ЭМУЛЬСИИ-ГЕЛИ,
или ДВУЖИДКОСТНЫЕ ПЕНЫ:
ПОЛУЧЕНИЕ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ**

В.Г.Бабак

e-mail: babak@ineos.ac.ru

тел : 135-65 02

Что такое « эмульсии-гели » ?

Biliquid foams

High internal phase ratio emulsions

Aphrons

Hydrocarbon gels

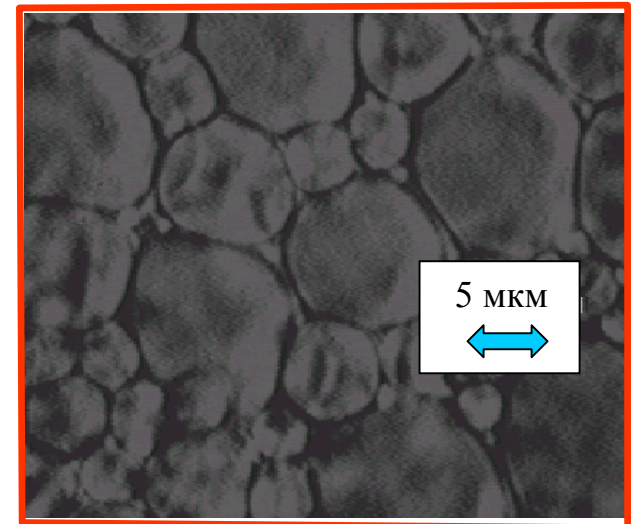
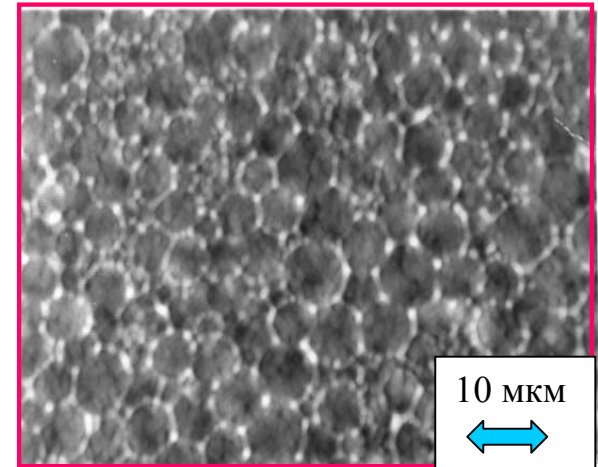
Свойства

Внутренняя фаза $\varphi = 80 - 99 \%$

Вязкоэластические свойства, $G' \sim 10^3$ Па

Пластичность, $\tau^* \sim 10^2 - 10^3$ Па

Низкое межфазное натяжение, $\sigma \sim 0.1-1$ мН/м



Получение эмульсий-гелей

❖ Концентрирование в поле силы тяжести и центрифугирование

- H.M.Princen, M.P.Aronson, J.C.I.S., 1980 ;
- M.P.Aronson, J.C.I.S., 1989 ;
- M.P.Aronson, M.F.Petko, Langmuir, 1993

❖ Ультрацентрифугирование

- O.Sonneville-Aubrun, V.Bergeron, et al. Langmuir, 2000

❖ Диализ

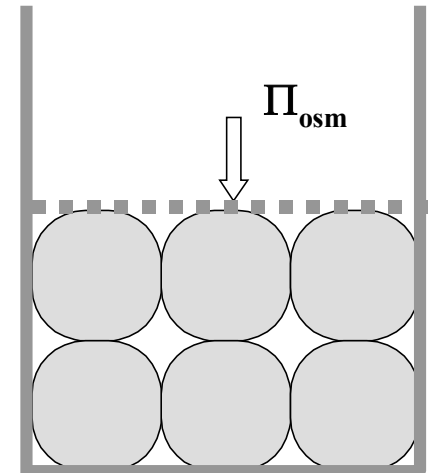
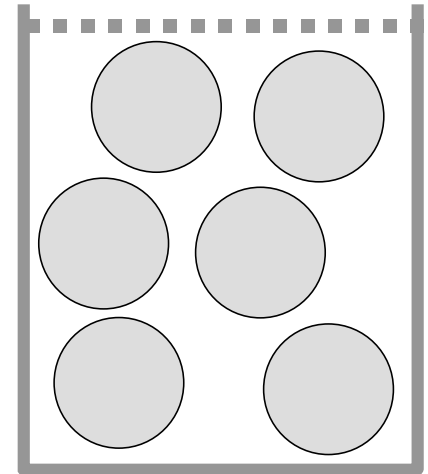
- T.G.Mason, J.Bibette, et al., Phys.Rev., 1997

❖ Стационарный сдвиг

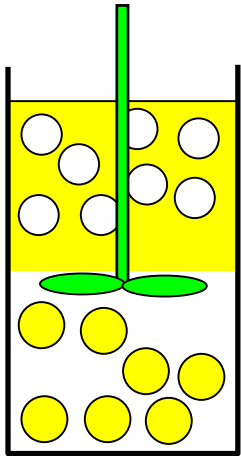
- M.P.Aronson, J.C.I.S., 1989 ;
- T.G.Mason, J.Bibette, Phys.Rev.Letters, 1997; Langmuir, 1997;
- C.Mabille, V.Schmitt, et al., 2000;
- P.Perrin, Langmuir, 2000)

❖ Фракционирование вытеснительной флокуляцией

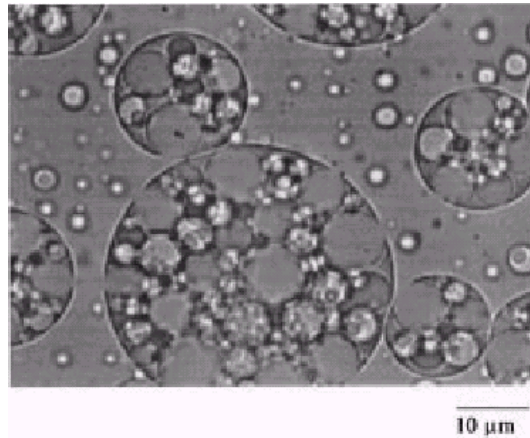
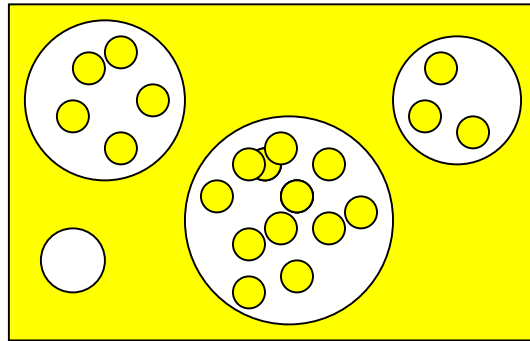
- J.Bibette, J.C.I.S., 1991;
- J.Bibette, D.Roux, F.Nallet, J.Phys.II France, 1992



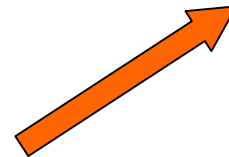
Тип эмульсий



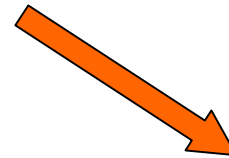
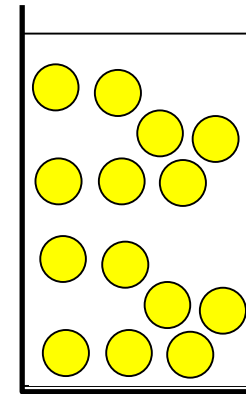
Эмульгирование



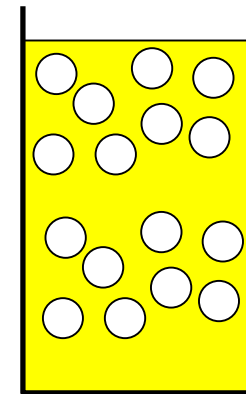
Смешанная
(множественная)
эмульсия



Эмульсия типа м/в
(прямая эмульсия)



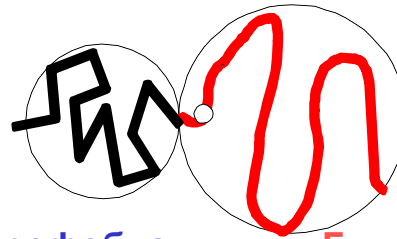
Эмульсия типа в/м
(обратная эмульсия)



Эмульгаторы и стабилизаторы

Поверхностно-активные вещества (ПАВ)

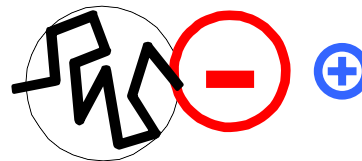
Неионные ПАВ



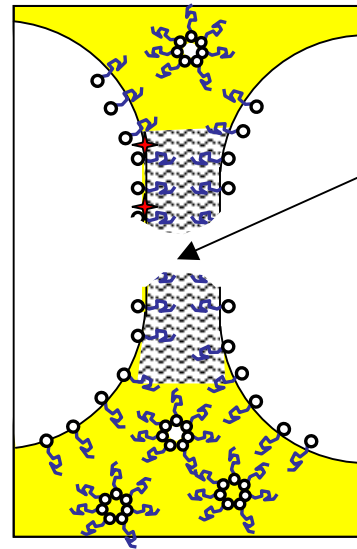
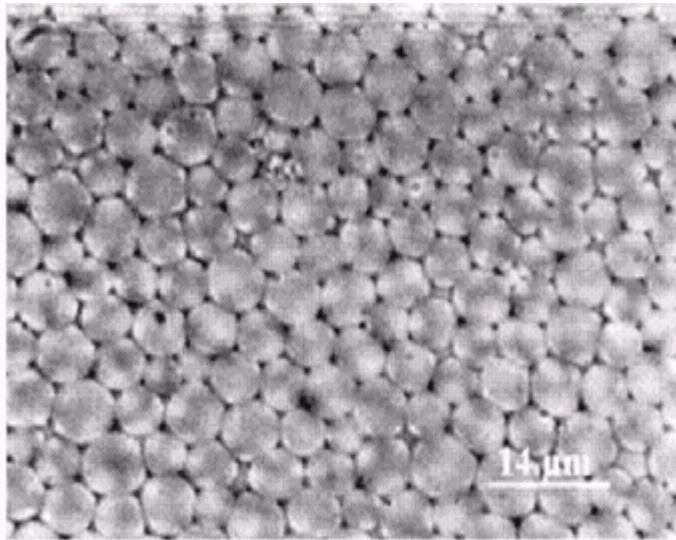
Гидрофобная
группа

Гидрофильная
группа

Ионные ПАВ



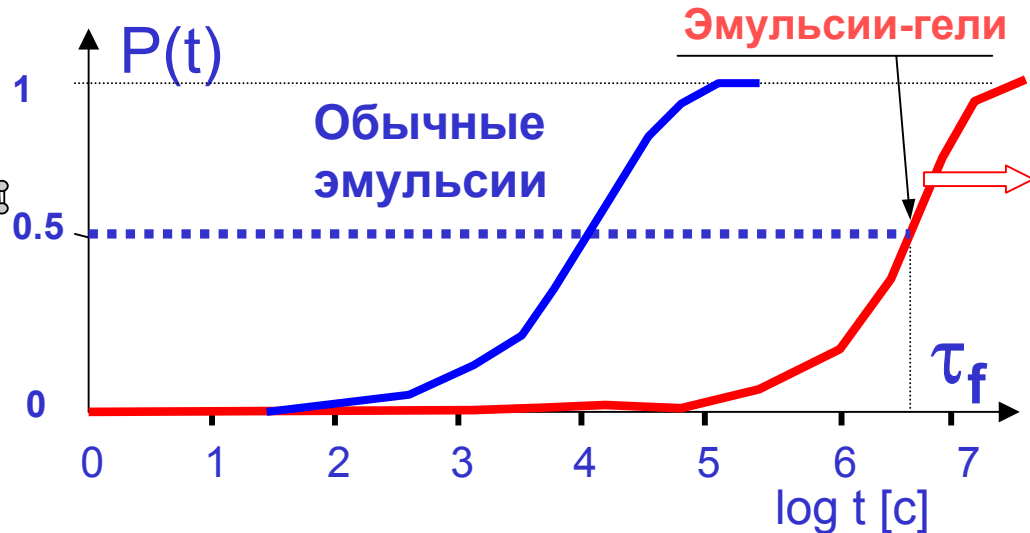
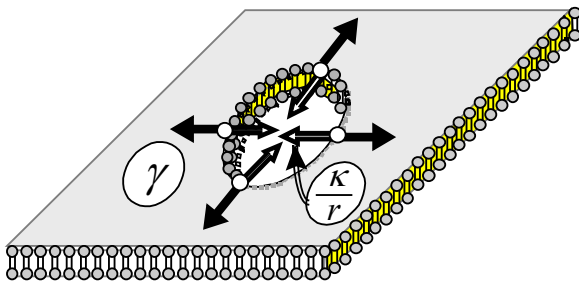
Устойчивость эмульсий к расслоению



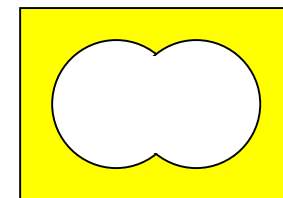
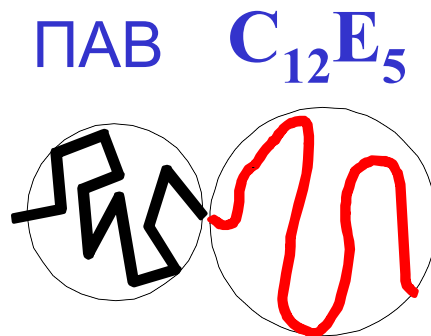
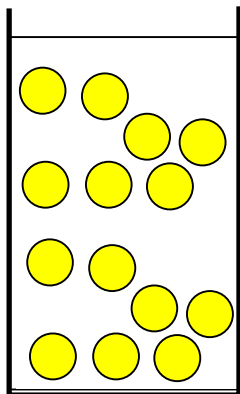
«Дырка» критического размера

Прорыв жидкой пленки (коалесценция капель)

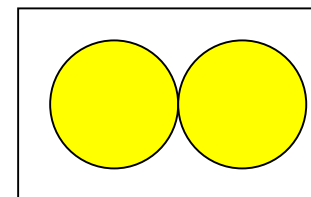
$\tau_f \sim 10^7$ с



Влияние строения молекул ПАВ на устойчивость эмульсий к расслоению



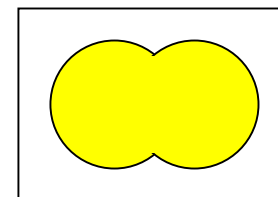
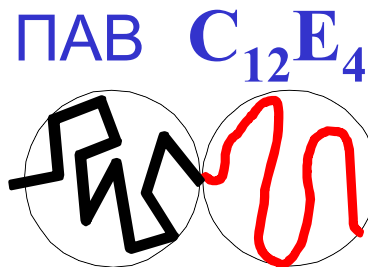
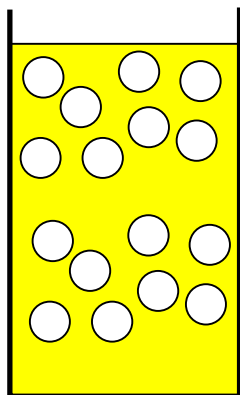
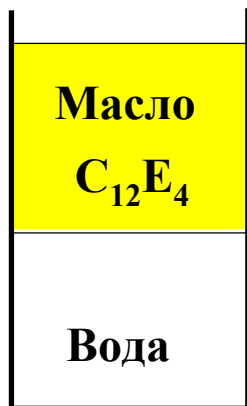
$\tau_f \sim 1 \text{ c}$



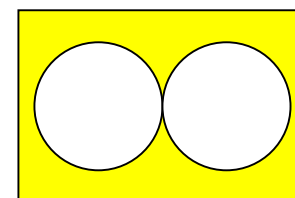
$\tau_f \gg 1 \text{ c}$

$T=25^\circ\text{C}$

масло: октан (C_8H_{17})

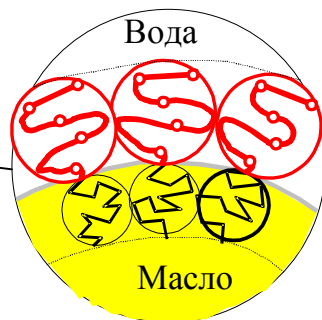
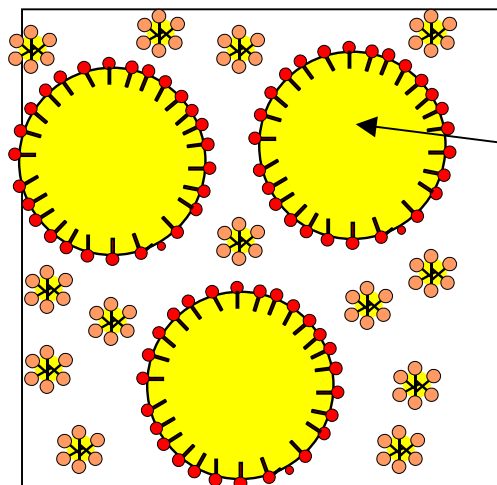


$\tau_f \sim 1 \text{ c}$



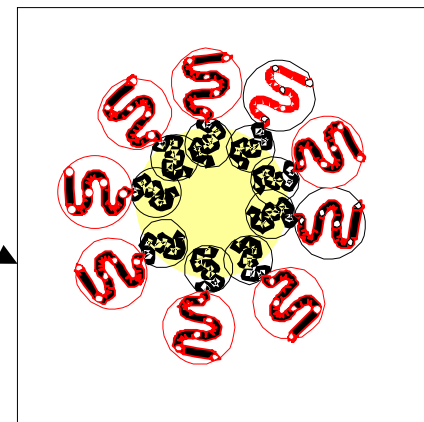
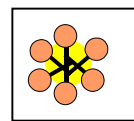
$\tau_f \gg 1 \text{ c}$

Адсорбционные слои ПАВ и мицеллы

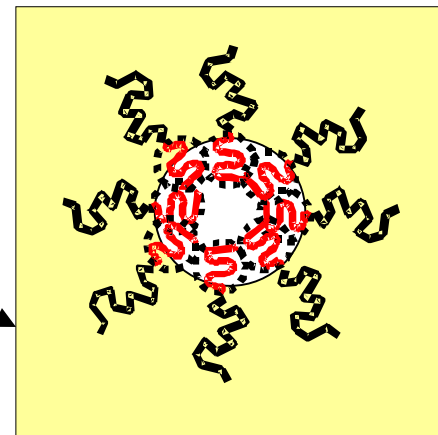
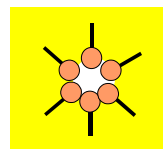
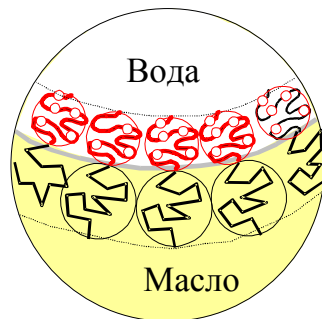
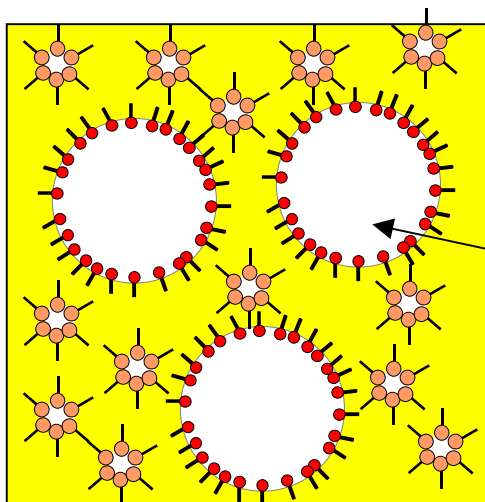


$T=25^{\circ}C$

масло: октан (C_8H_{17})

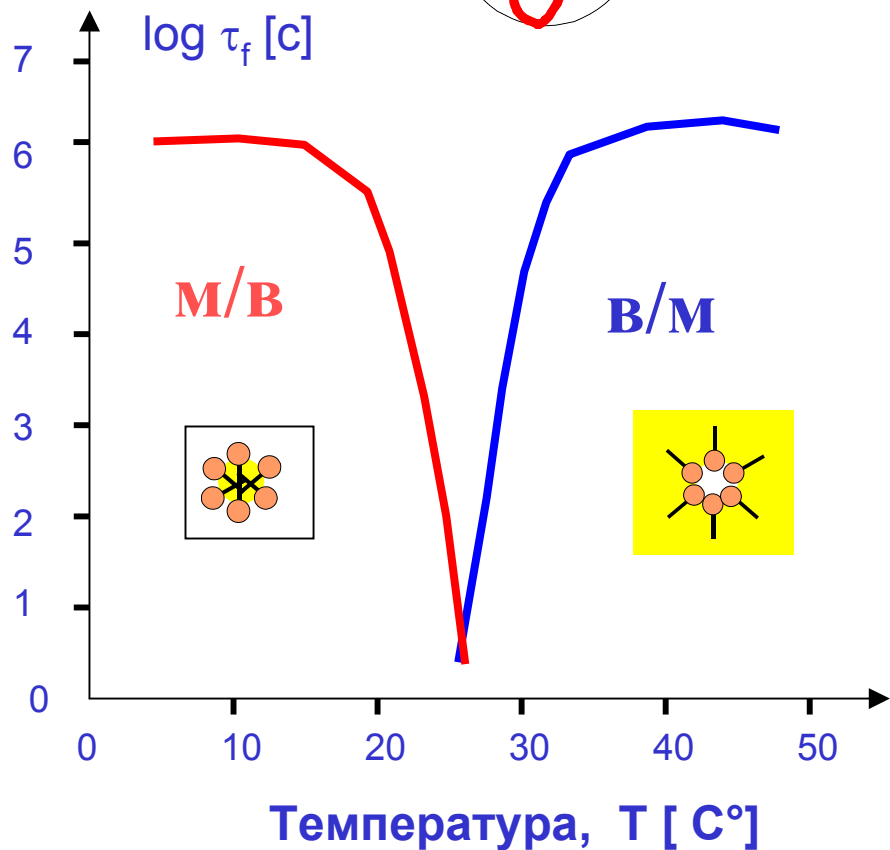
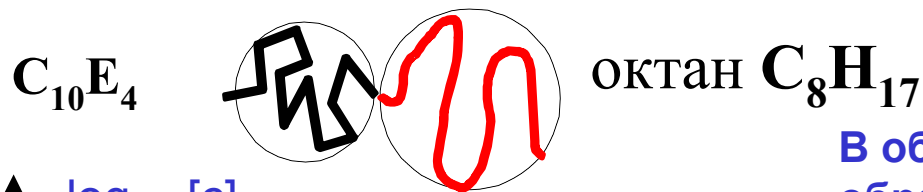


Сферическая мицелла
прямого типа



Сферическая мицелла
обратного типа

Влияние температуры на устойчивость эмульсий к расслоению



В области температур ниже $\sim 25^\circ\text{C}$ образуется эмульсия типа м/в; с ростом T устойчивость этой эмульсии снижается и при $T \sim 25^\circ\text{C}$ равна нулю

В области температур выше $\sim 25^\circ\text{C}$ образуется эмульсия типа в/м; с ростом T устойчивость этой эмульсии увеличивается

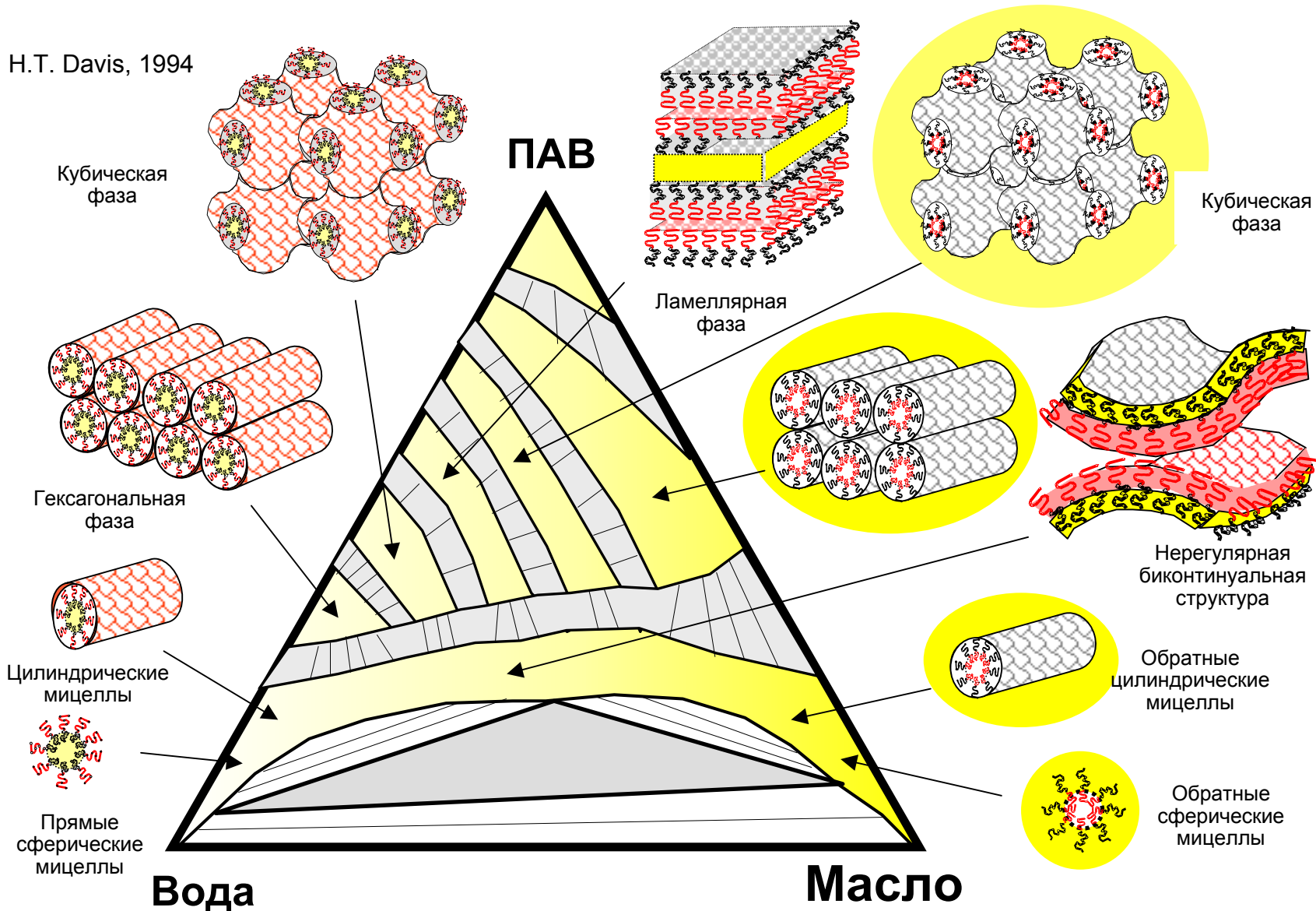
При замене октана C_8H_{17} на тетрадекан $C_{14}H_{29}$ температура неустойчивости эмульсий возрастает до $T \sim 35^\circ\text{C}$

Особенные свойства эмульсий-гелей

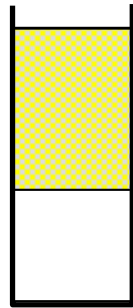
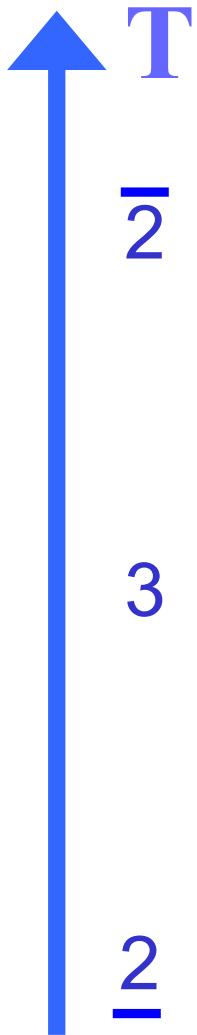
- * Чрезвычайно высокая устойчивость эмульсионных пленок к прорыву ($\tau_f \sim 10^7$ с)
- * Критическая зависимость устойчивости эмульсий и эмульсионных пленок от физико-химических параметров : температуры, размера гидрофильной и гидрофобной частей ПАВ, молекулярной массы молекул органического растворителя, концентрации электролита, и др.
- * Самопроизвольное образование эмульсий из мицеллярных растворов при быстром изменении температуры, концентрации соли и др.
- * Вязко-эластические и пластические свойства (существование предела пластической прочности на сдвиг), и их критическая зависимость от физико-химических параметров.

Микроэмульсионные структуры в тройных системах

H.T. Davis, 1994



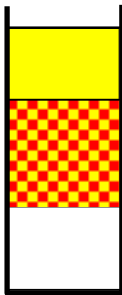
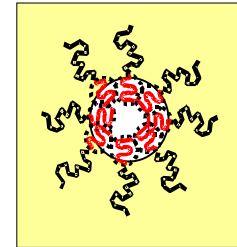
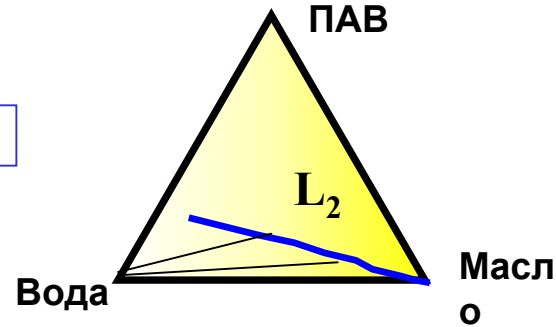
Влияние температуры на фазовое поведение системы вода-масло-ПАВ



b

Винзор II

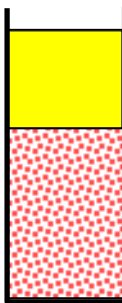
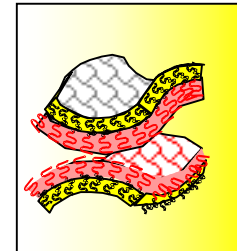
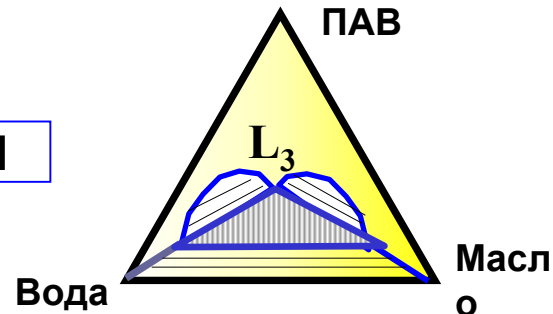
a



b

Винзор III

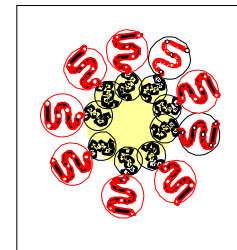
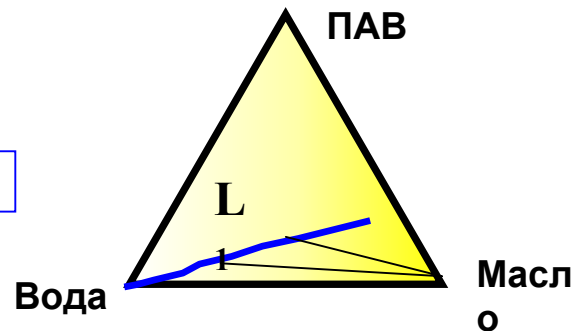
a



b

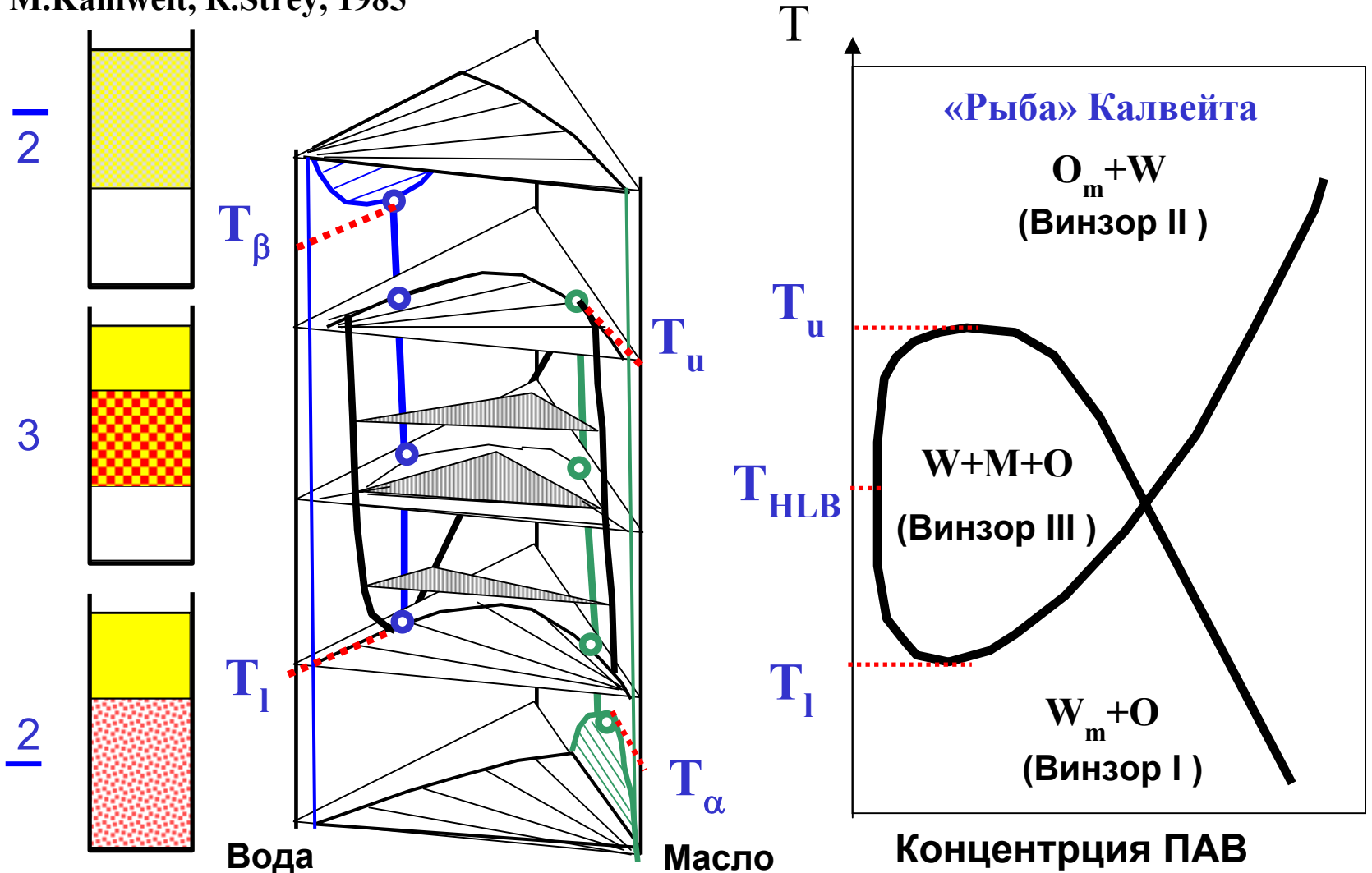
Винзор I

a



Влияние температуры на фазовое поведение системы вода-масло-ПАВ

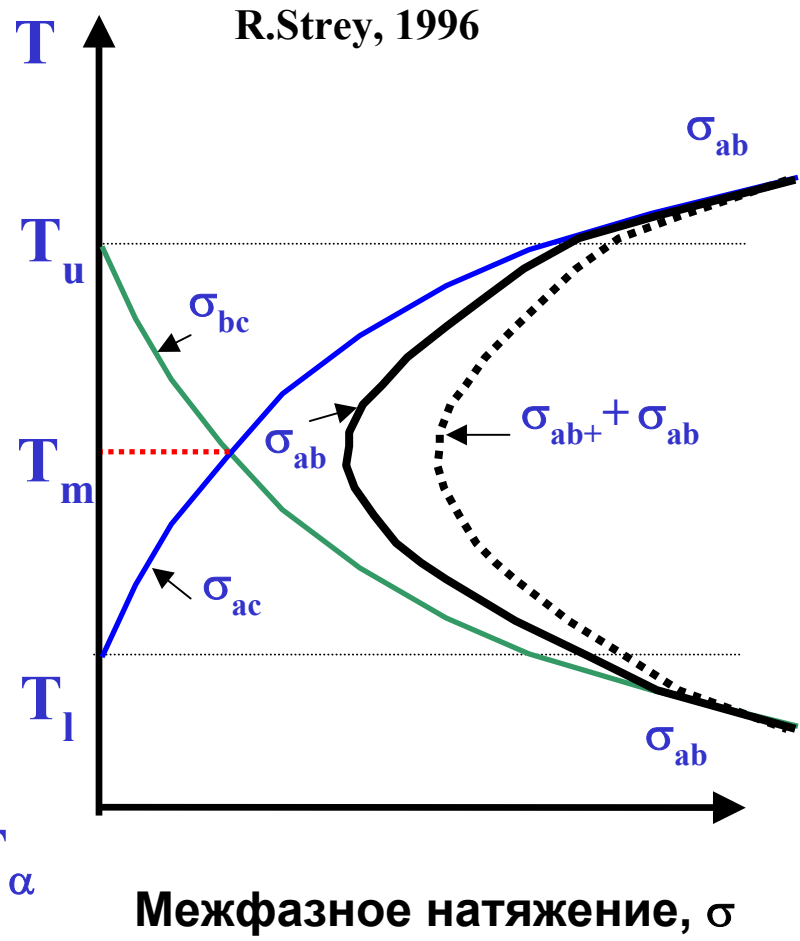
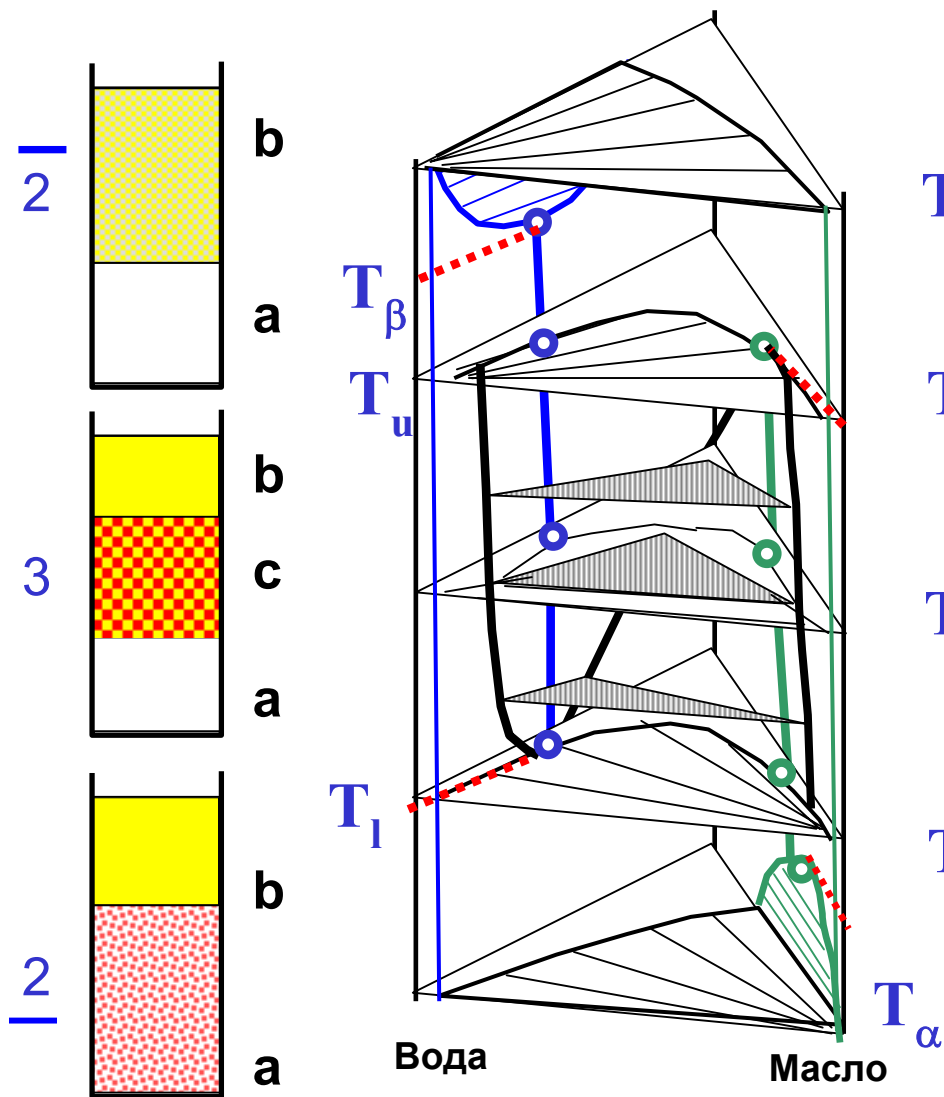
M.Kahlweit, R.Strey, 1985



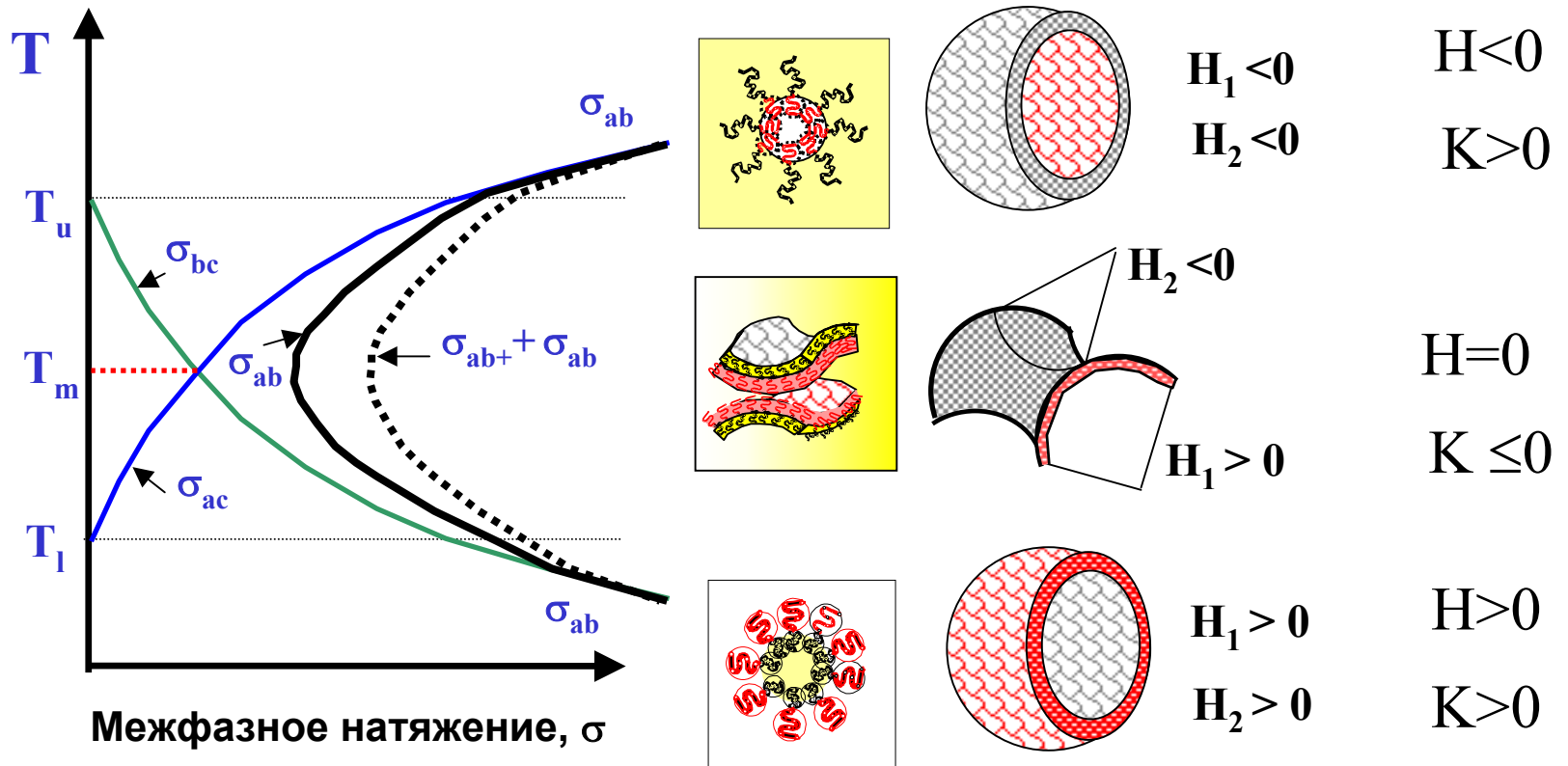
Межфазное натяжение на границах Винзоровских фаз

М. Kahlweit, R. Strey, 1985

R. Strey, 1996



Связь межфазного натяжения с кривизной микроэмульсионных структур



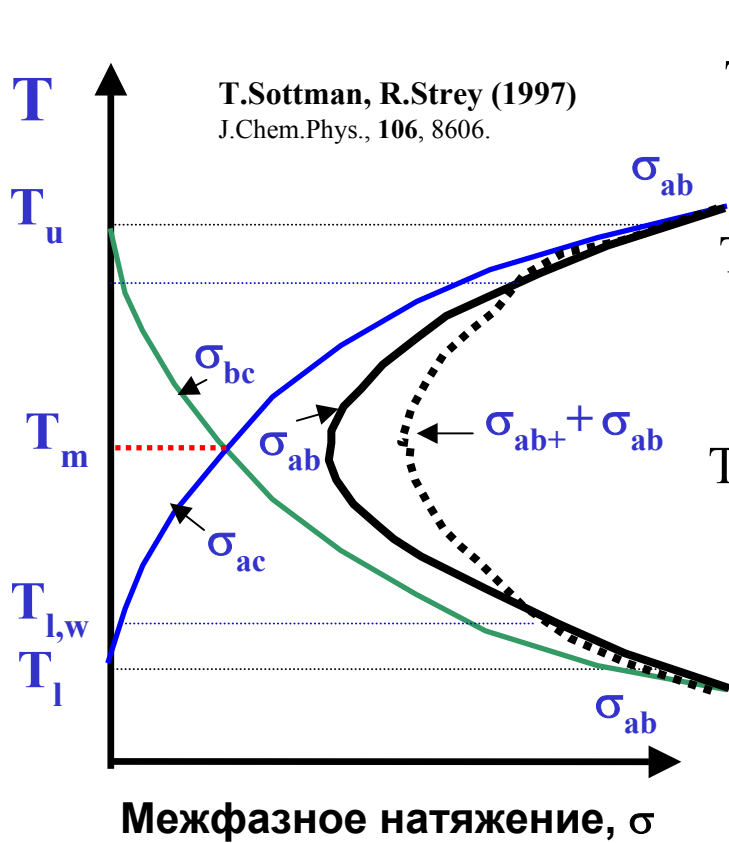
$$T_m = (T_u + T_l) / 2$$

T_m - температура инверсии фаз

$$H = (H_1 + H_2) / 2$$

$$K = H_1 H_2$$

Сверхнизкое межфазное натяжение



T.Sottman, R.Strey (1997)
J.Chem.Phys., 106, 8606.

$$T < T_l \quad \sigma_{ab} = \sigma_{bc} \quad \sigma_{ac} = \sigma_{o,ac} \left(\frac{|T_l - T|}{T_l} \right)^\mu$$

$\mu = 1, 26$

B.Widom (1987) Langmuir, 3, 12

$$T_l < T < T_{l,w} \quad \sigma_{ab} \geq \sigma_{ac} + \sigma_{bc}$$

$T_{l,w}$ - температура перехода
«смачивание-несмачивание»

$$T_{l,w} < T < T_m \quad \sigma_{ab} < \sigma_{ac} + \sigma_{bc}$$

R.Strey (1994)

Colloid Polymer Sci., 272, 1005.

$$\sigma_{ab} \xi^2 \cong kT$$

ξ - характерный размер структурных элементов микроэмульсии например, средний размер мицелл, или размер ячеек в нерегулярной биконтинуальной структуре средней фазы

$$H \approx c(T - T_m)$$

$$T_m = (T_u + T_l)/2 \quad H_l - H_u \approx c(T_u - T_l)$$

$$c \sim 10^{-3} \text{ \AA}^{-1} \text{ K}^{-1} \quad H_l \approx -H_u$$

Минимальное межфазное натяжение σ_m снижается при сближении температур T_u и T_l .

Зависимость межфазного натяжения от температуры

Helfrich WA (1973)

Elastic properties of lipid bilayers:
theory and possible experiments.

Z.Naturforsch C 8, 693-705

$$\Delta g_c = 2\kappa(H - H_o)^2 + \bar{\kappa} K$$

$$K = H_1 H_2 < 0$$

T.Sottman, R.Strey (1997)

J.Chem.Phys., 106, 8606.

$$\sigma_{ab} = 2H^2(\kappa + \bar{\kappa}) + \bar{\kappa}K$$

При $T=T_m$

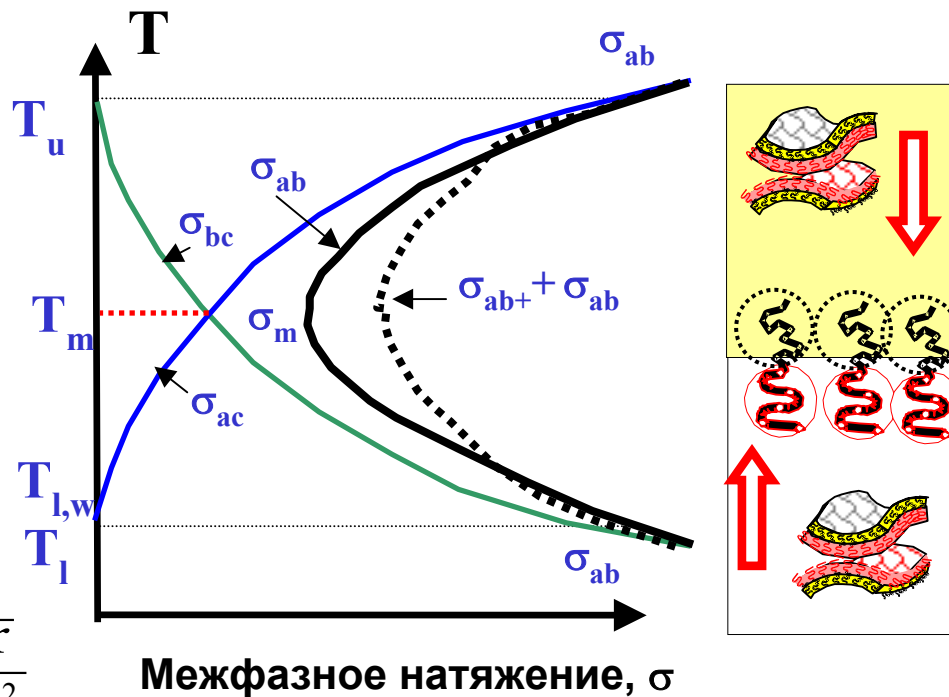
$$\sigma_m = +\bar{\kappa}K_m = -\bar{\kappa}H_1H_2|_m = -\frac{\bar{\kappa}}{\xi^2}$$

$$\tau = \frac{2(T - T_m)}{(T_u - T_l)}$$

$$\sigma^* = \sigma_{ab} / \sigma_m$$

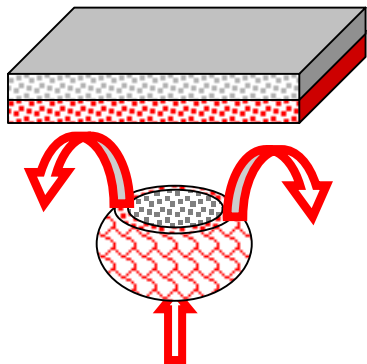
$$\xi = \frac{2}{c(T_u - T_l)}$$

$$\tau^* = \tau \sqrt{-\frac{2\kappa + \bar{\kappa}}{\bar{\kappa}}}$$



$$\sigma^* = (\tau^*)^2 + 1$$

Связь межфазного натяжения с кривизной микроэмульсионных структур



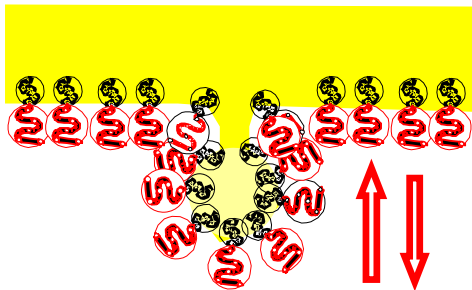
Helfrich WA (1973)

Elastic properties of lipid bilayers:
theory and possible experiments.
Z.Naturforsch C 8, 693-705

Babak VG (1993)

Thermodynamic
of Free and of Interacting Curved
Interfaces in Liquid Films.
Russian Chemical Reviews 62,
703-727.

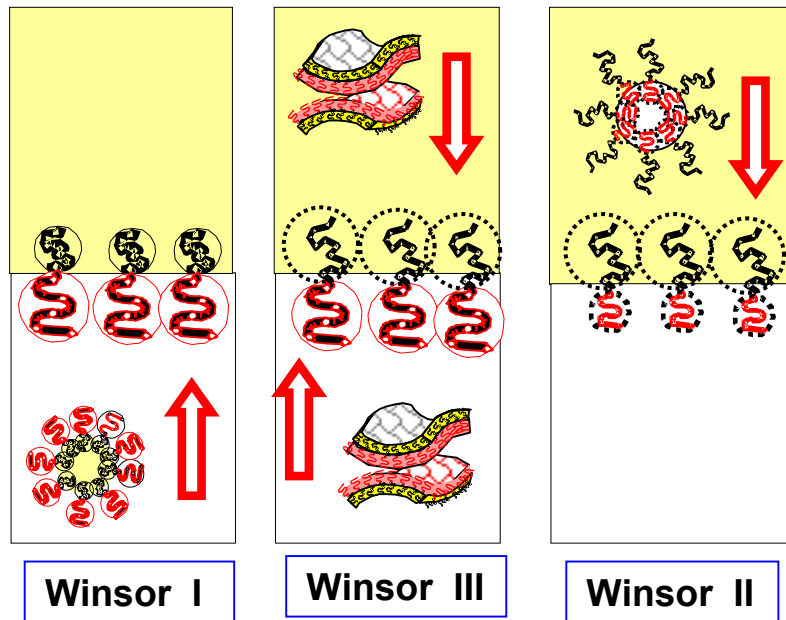
$$\Delta g_c = 2\kappa(H - H_o)^2 + \bar{\kappa} K$$



Сферические мицеллы

$$H = H_1 = H_2 > 0$$

$$K = H_1 H_2 = H_2 > 0$$



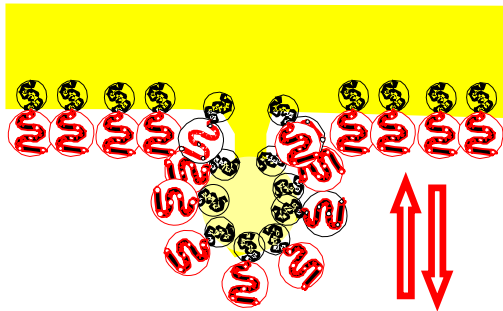
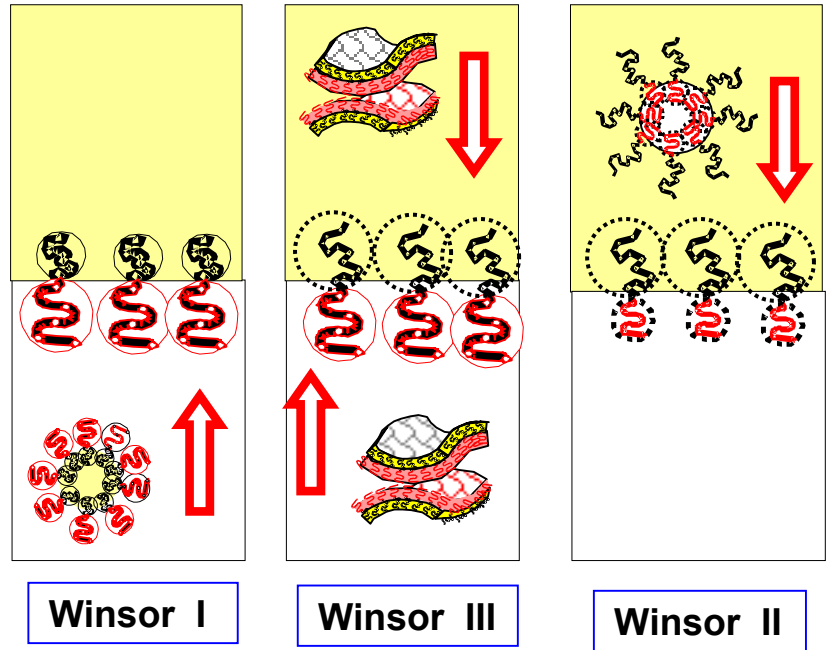
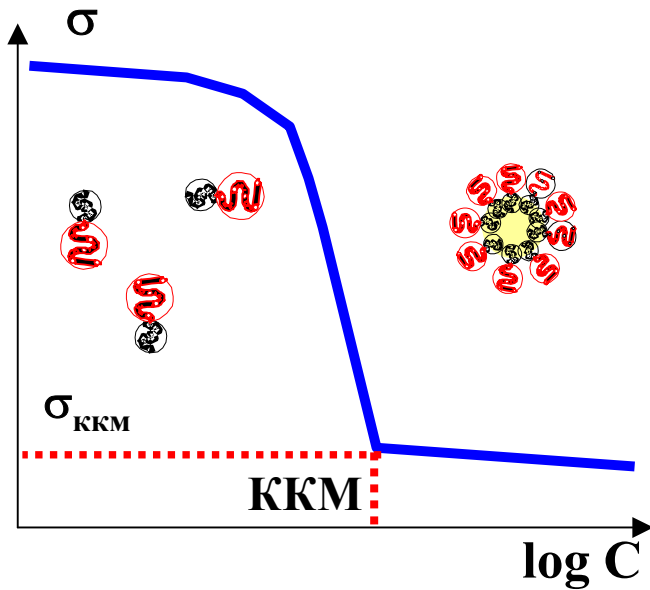
$$\Delta g_c(H_o) \cong \bar{\kappa} H_o^2$$

$$\Delta g_c(0) \cong 2\kappa H_o^2$$

$$\sigma_o = +\Delta g_c(0) - \Delta g_c(H_o)$$

$$\sigma_o = \sigma_{\min} + (2\kappa - \bar{\kappa})H_o^2$$

Связь межфазного натяжения с размером мицелл

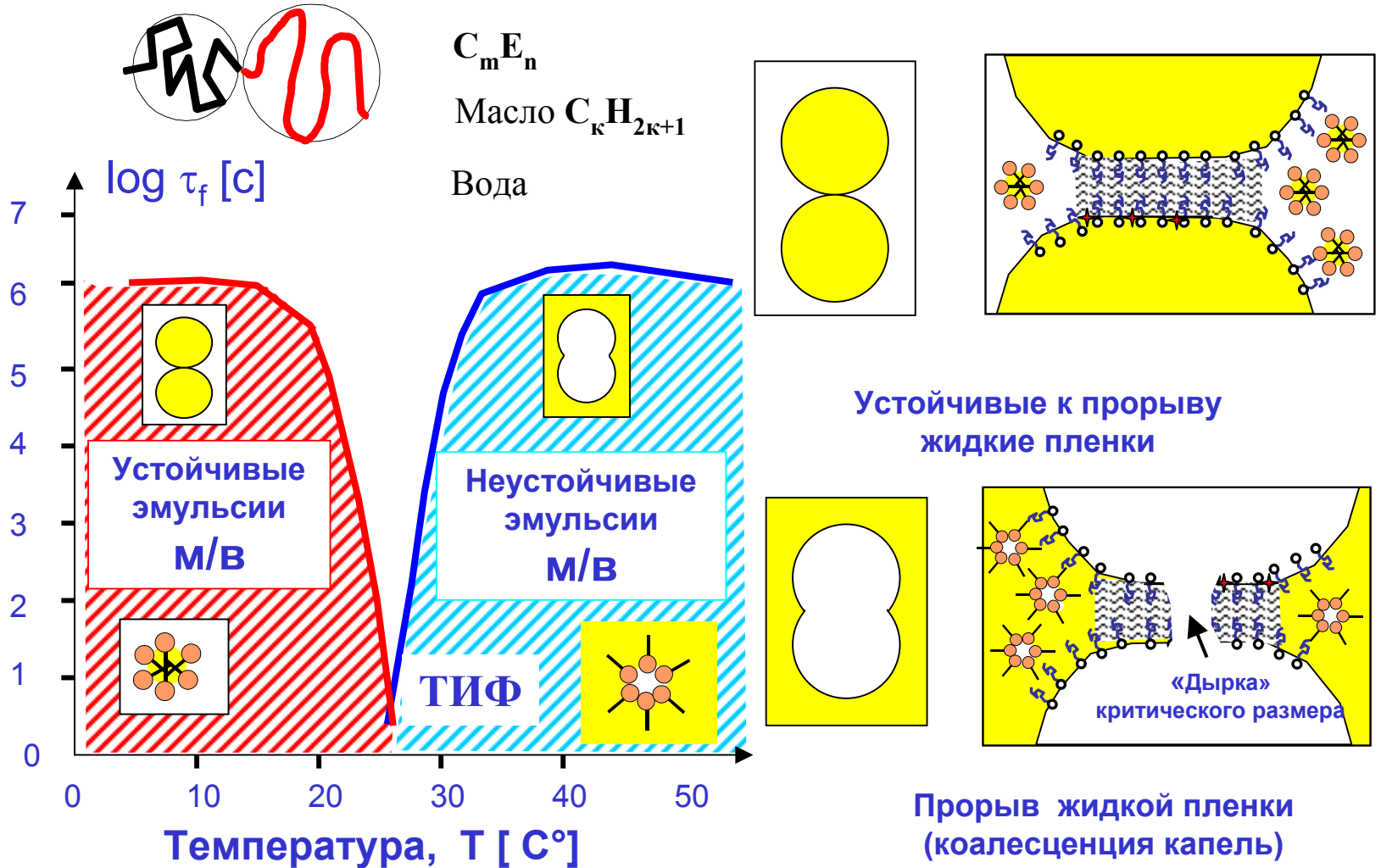


Сферические мицеллы

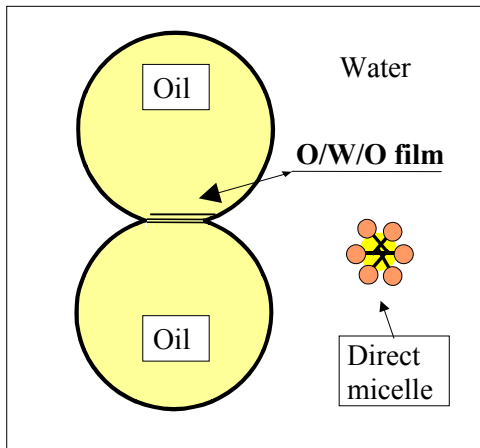
$$\sigma_{KKM} = \sigma_{\min} + (2\kappa - \bar{\kappa})H_o^2$$

$$\sigma_{KKM} \cong (2\kappa - \bar{\kappa})H_o^2 \quad H_o \cong \frac{1}{r_{mic}}$$

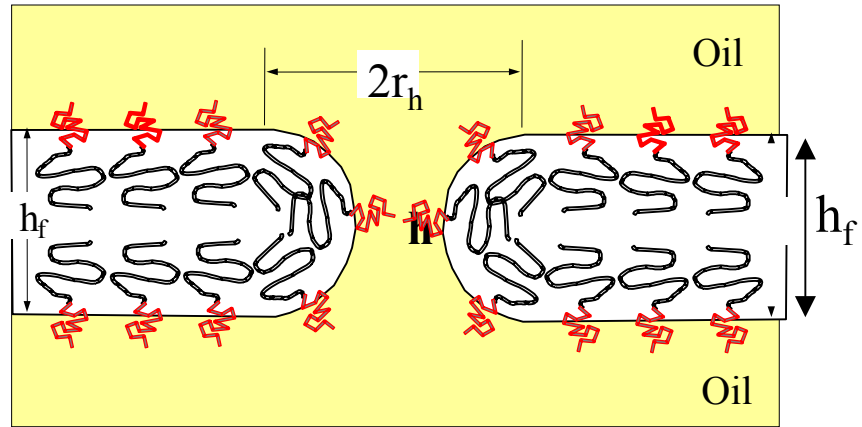
Почему пленки масло-вода-масло чрезвычайно устойчивы в области температур $T < PIT$, и крайне неустойчивы при $T > PIT$?



Критерий устойчивости эмульсионных пленок



$$T < PIT$$



Работа образования дырки (hole) радиуса r_h

$$W_h = 2\pi r_h \tau - \pi r_h^2 \gamma_f$$

где γ_f - натяжение пленки толщины h_f

$$\gamma_f = 2\sigma_f + \Pi h_f$$

$$\sigma_f = \sigma_o + \frac{1}{2} \Delta\Omega(h_f)$$

$$\Delta\Omega(h_f) = \int_{h_f}^{\infty} \Pi(h) dh$$

«Дырка» критического размера r_h^* и соответствующая работа образования W^* определяются из условия

$$\left. \frac{\partial W_h}{\partial r_h} \right|_{T, \mu_i} = 0$$

$$r_h^* = \frac{\tau}{\gamma_f} \quad W^* = \frac{\pi \tau^2}{\gamma_f}$$

Если $\Pi h_f \ll \sigma_f$ то получаем $W^* \cong \frac{\pi \tau^2}{2\sigma_o}$

где σ_h - межфазное натяжение искривленной поверхности дырки

Критерий устойчивости эмульсионных пленок

Оценка линейного натяжения τ

Площадь поверхности «дырки» A_k равна

$$A_h \cong 2\pi r_h \pi \frac{h_f}{2} \cong \pi^2 h_f r_h$$

Соответствующий избыток свободной энергии равен

$$\Delta\tilde{\Omega} \approx \sigma_h A_h$$

По определению

$$\tau \cong \frac{\Delta\tilde{\Omega}_A}{2\pi r_h} \cong h_f \sigma_h$$

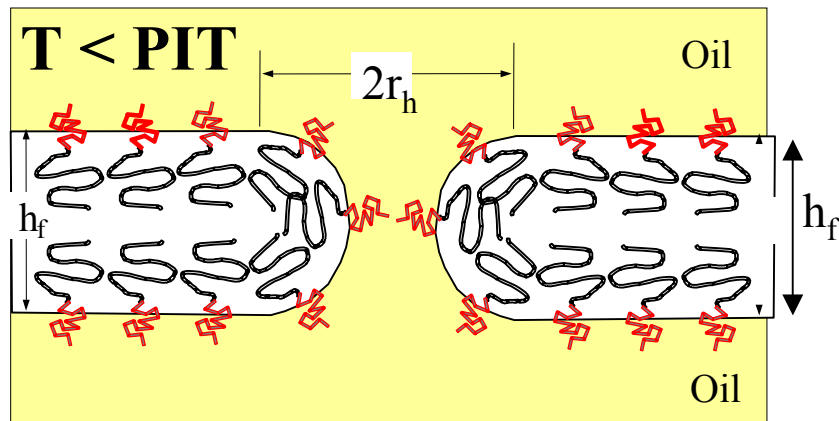
Энергия активации W^* образования критической «дырки» равна

$$W^* \cong \frac{\pi \tau^2}{2\sigma_o} \cong \frac{h_f^2 \sigma_h^2}{\sigma_o} \quad r_h^* \cong \frac{h_f \sigma_h}{2\sigma_o}$$

Выражение для W^*

$$H_1 \cong -\frac{2}{h_f} \quad H_2 \cong +\frac{1}{r_h}$$

$$H = (H_1 + H_2)/2 \cong -\frac{1}{h_f} + \frac{1}{2r_h}$$



Поскольку при r_h^* $H \cong 0$, то $\sigma_h \cong \sigma_o$

$$W^* \cong h_f^2 \sigma_o \quad \text{De Vries (1958)}$$

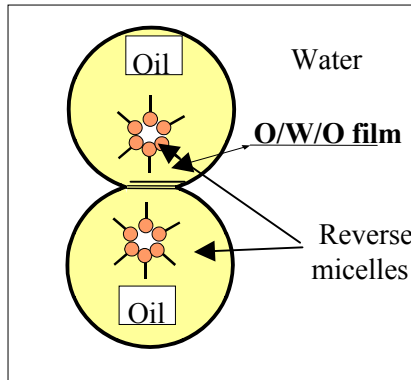
Численная оценка энергии активации W^*

$$h_f \sim 10 \text{ nm} \quad \sigma_o \sim 1 \text{ mN/m} \quad W^* \cong 50 \text{ kT}$$

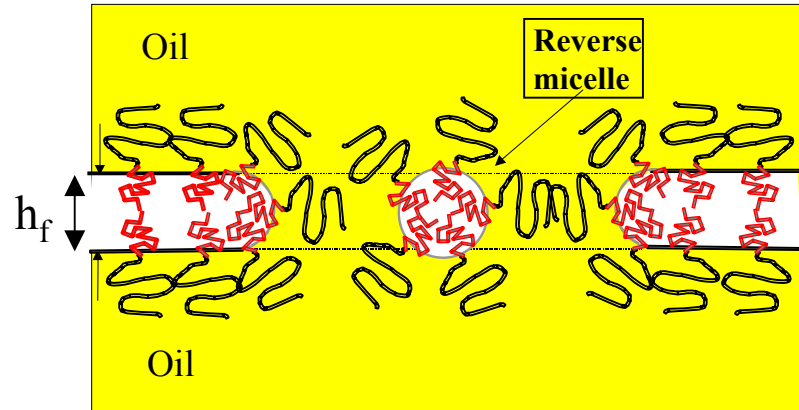
Вывод

В области температур $T < PIT$ эмульсионные пленки м/в/м и прямые эмульсии типа м/в устойчивы к разрушению

Критерий устойчивости эмульсионных пленок



$T > PIT$



$$\sigma_h \cong \sigma_{\min} \ll \sigma_o \quad r_h^* \cong \frac{h_f \sigma_h}{2\sigma_o} \ll h_f$$

$$H_2 \cong +\frac{1}{r_h} \quad H_1 \cong -\frac{2}{h_f}$$

$$H_o \cong -\frac{1}{r_{mic}} \quad W^* \cong \frac{h_f^2 \sigma_{\min}^2}{\sigma_o}$$

$$H = \frac{H_1 + H_2}{2} \cong \frac{H_1}{2} \cong -\frac{1}{h_f}$$

Численная оценка энергии активации W^*

$$\sigma_o \sim 1 \text{ mN/m} \quad \sigma_{\min} \sim 10^{-3} \text{ mN/m}$$

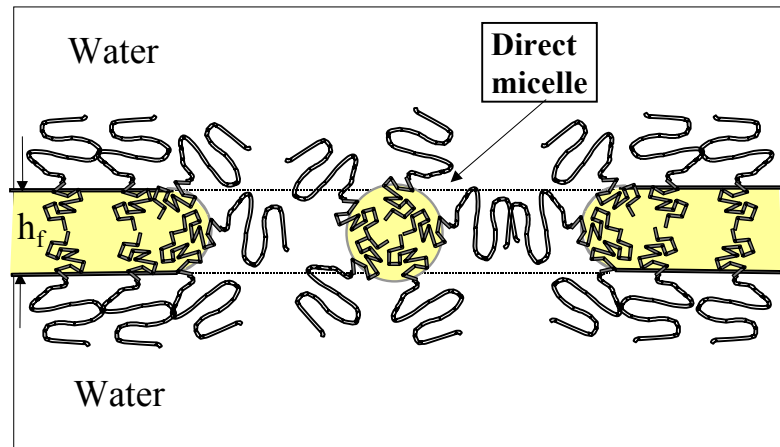
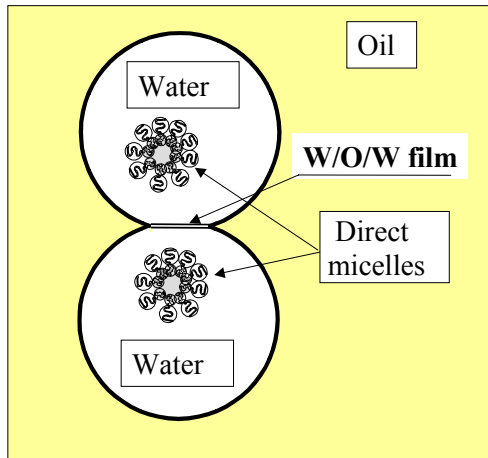
$$h_f \sim 10 \text{ nm}$$

$$W^* \cong \frac{h_f^2 \sigma_{\min}^2}{\sigma_o} \cong 10^{-25} \text{ J} \ll kT$$

Вывод

В области температур $T > PIT$ эмульсионные пленки м/в/м и прямые эмульсии типа м/в крайне не устойчивы к разрушению

Критерий устойчивости эмульсионных пленок



T < PIT

$$H_o \cong \frac{1}{h_f}$$

$$H_1 \cong +\frac{2}{h_f} \quad H_2 \cong -\frac{1}{r_h}$$

$$H = \frac{H_1 + H_2}{2} \cong \frac{H_1}{2} \cong +\frac{1}{h_f}$$

$$W^* \cong \frac{h_f^2 \sigma_{\min}^2}{\sigma_o} \cong 10^{-25} J \ll kT$$

$$\sigma_h \cong \sigma_{\min} \ll \sigma_o$$

$$\sigma_o \sim 1 \text{ mN/m} \quad \sigma_{\min} \sim 10^{-3} \text{ mN/m}$$

$$h_f \sim 10 \text{ nm}$$

В области T < PIT

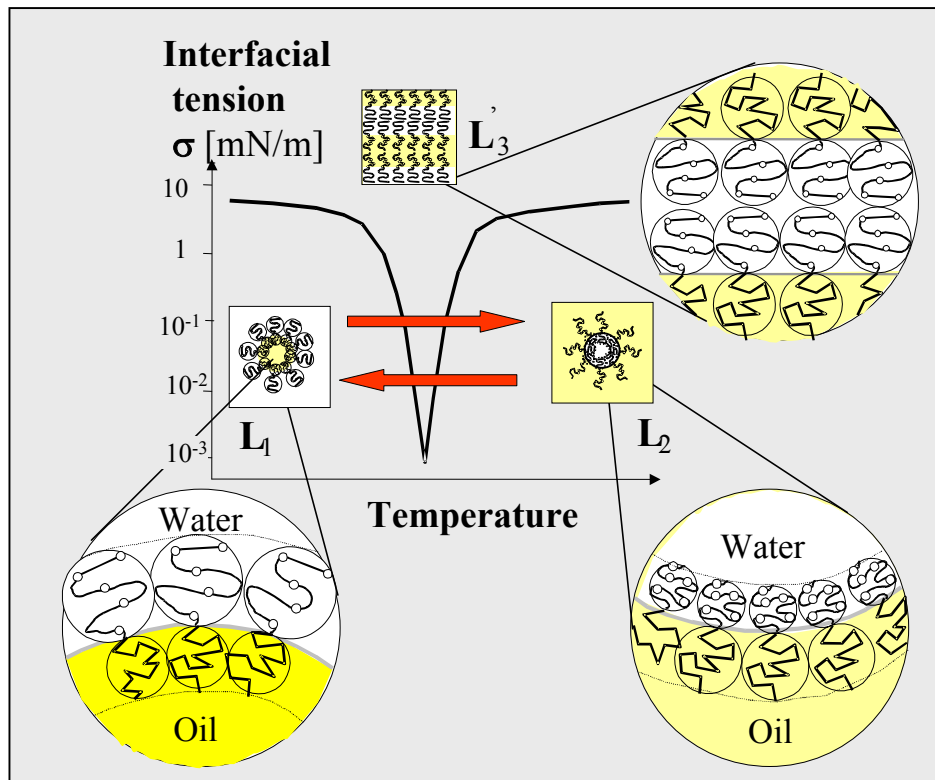
эмульсии типа в/м неустойчивы

Предсказательные возможности предложенной модели прорыва жидких пленок

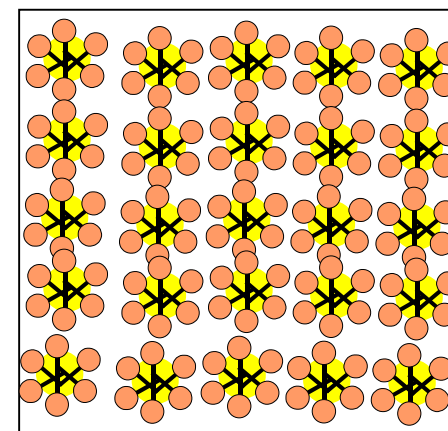
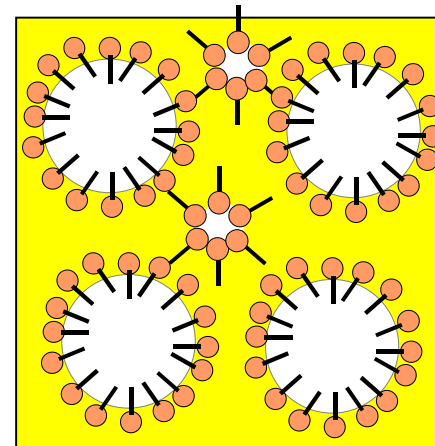
- ❖ Устойчивость эмульсий обоих типов увеличивается при удалении от температуры РИТ в тройной системе вода-масло-ПАВ. Этот известный экспериментальный факт объясняется увеличением межфазного натяжения в пленке и соответственно увеличением термического активационного барьера W^* для прорыва пленки.
- ❖ Устойчивость эмульсий обоих типов увеличивается с ростом размера молекул ПАВ при одинаковом ГЛБ. Этот известный экспериментальный факт объясняется увеличением толщины жидкой пленки между капельками эмульсии и соответственно увеличением W^*
- ❖ Увеличение жесткости монослоев путем увеличения энергии когезии между молекулами ПАВ (например, используя фторированные ПАВ или масла) позволяет значительно увеличить устойчивость эмульсий к разрушению

Используя ПАВ с повышенным содержанием групп ОН или других групп, способных к образованию водородных связей, удастся увеличить жесткость монослоев и устойчивость эмульсий

Спонтанное образование эмульсий-гелей при резком изменении температуры



T
↑

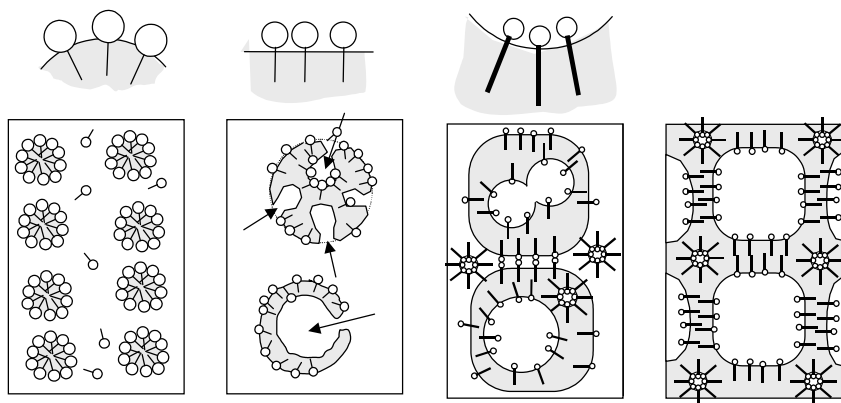


H.Kunieda, Y.Fukui, H.Uchiyama, C.Solans,

Langmuir, 1996

H_2O - декан - C_{12}E_4

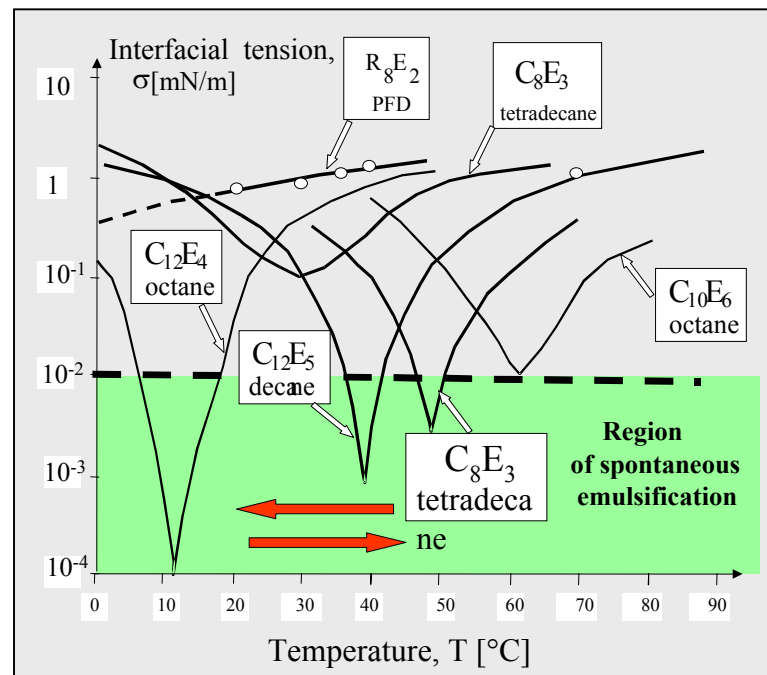
Spontaneous formation of gel-emulsions by PIT route



Минимальное межфазное натяжение σ_{\min} должно быть меньше некоторого критического значения σ^*

$$4\pi R^2 \sigma^* \sim kT$$

Для $R \sim 10 \mu\text{м}$ $\sigma^* \sim 10^{-2}$ мН/м



$\text{H}_2\text{O} - \text{decane} - \text{C}_{12}\text{E}_4$

L_1 -phase \longrightarrow W/O – gel-emulsion

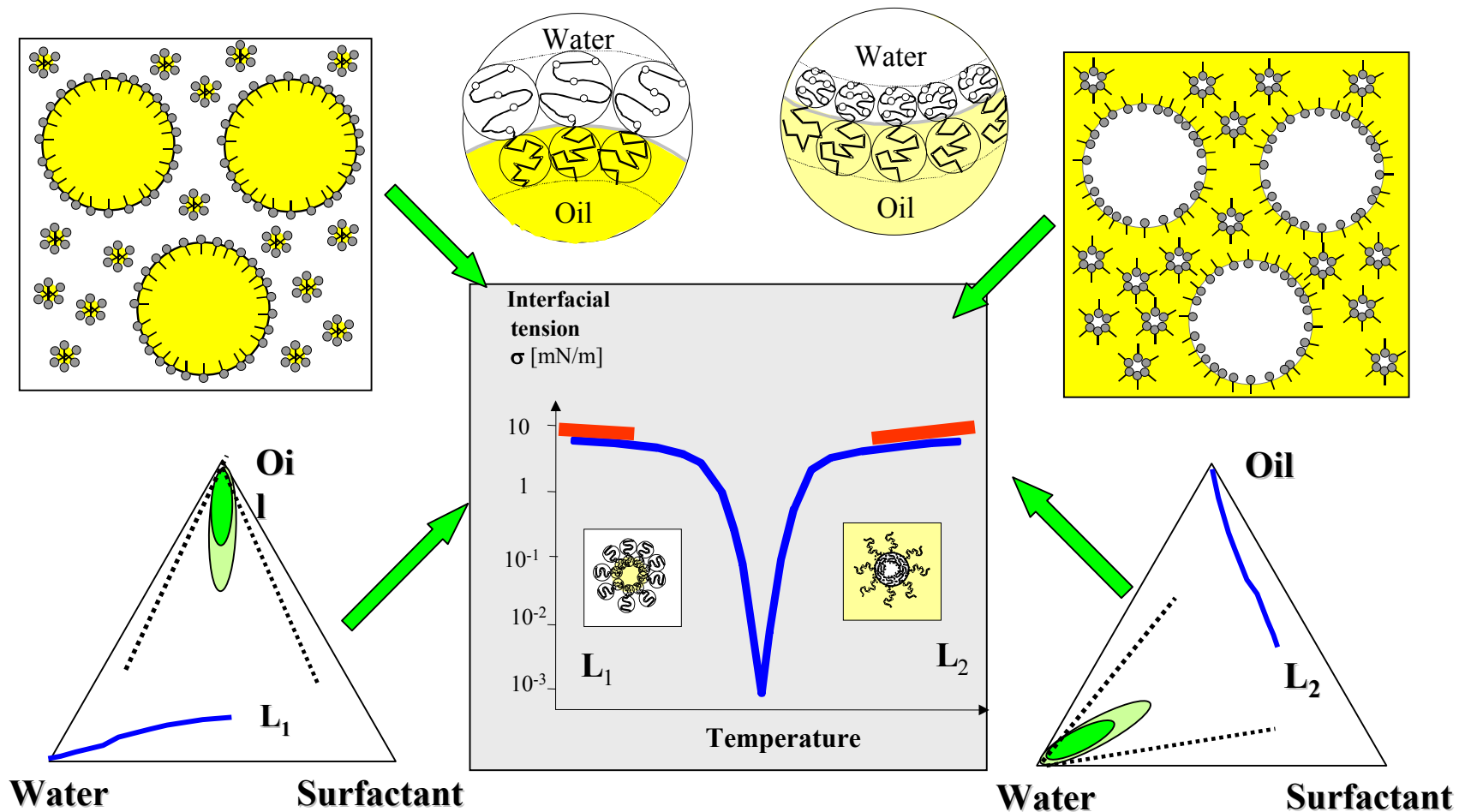
H.Kunieda, Y.Fukui, H.Uchiyama, C.Solans, *Langmuir*, 1996

$\text{H}_2\text{O} - \text{tetradecane} - \text{C}_{12}\text{E}_5$

L_2 -phase \longrightarrow O/W – gel-emulsion

LTaisne, B.Cabane, *Langmuir*, 1998

Образование эмульсий-гелей механическим диспергированием



Неадгезивные эмульсии

Осмотическое сжатие

$$\Pi_{osm} = \left(\frac{\sigma}{R} \right) \Phi(\varphi)$$

Полуэмпирическое уравнение состояния

Н.М.Princen, J.C.I.S., 1986

$$\pi_{osm} = \Pi_{osm} / \left(\frac{\sigma}{R} \right) = 0,584 \frac{\varphi^{1/3}}{\sqrt{1-\varphi}}$$

$\varphi \rightarrow 1$

$$\pi_{osm} \cong 1,6 \varphi^2 (\varphi - \varphi_c)$$

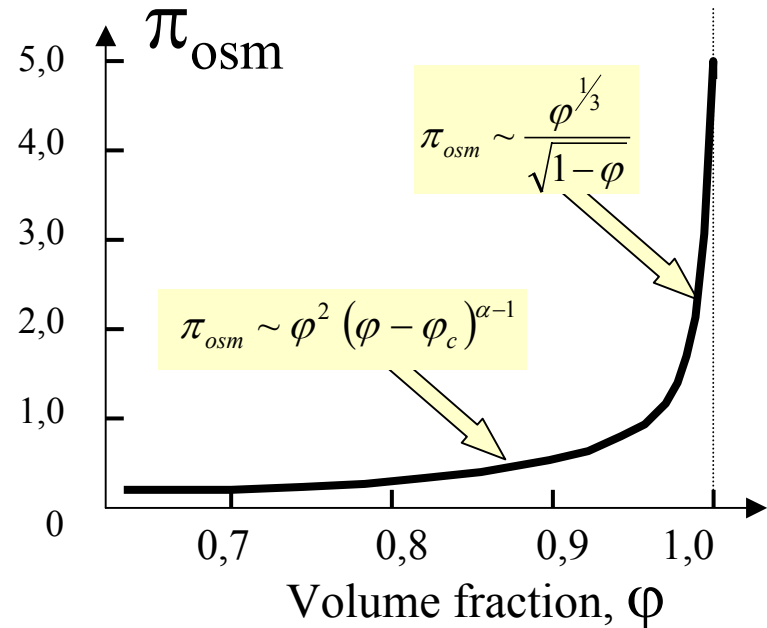
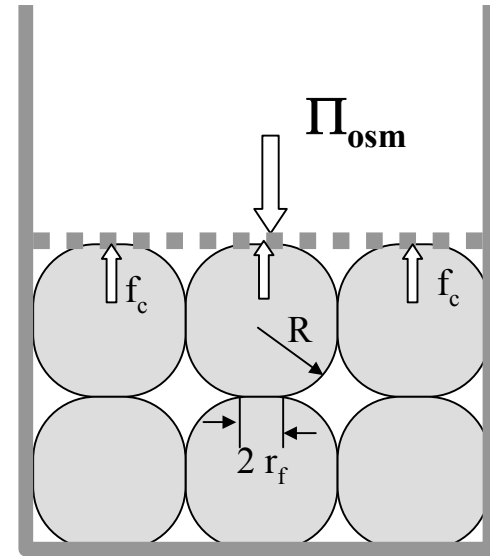
$0,72 < \varphi < 0,9$

$$\pi_{osm} \cong B \varphi^2 (\varphi - \varphi_c)^{\alpha-1}$$

where the constants B , φ_c and $\alpha \geq 2$ are adjustable parameters depending on the geometry of the droplet packing.

T.G.Mason, et al., Phys.Rev.E, 1997

M.-D.Lacasse, et al., Phys.Rev.E, 1996



АДГЕЗИВНЫЕ ЭМУЛЬСИИ

Характерные особенности :

- ❖ Флокуляция под действием вытеснительного осмотического давления мицелл

Н.М.Princen, J M.P.Aronson, *J.C.I.S.*, 1986 ;

M.P.Aronson, *Langmuir*, 1989 ;

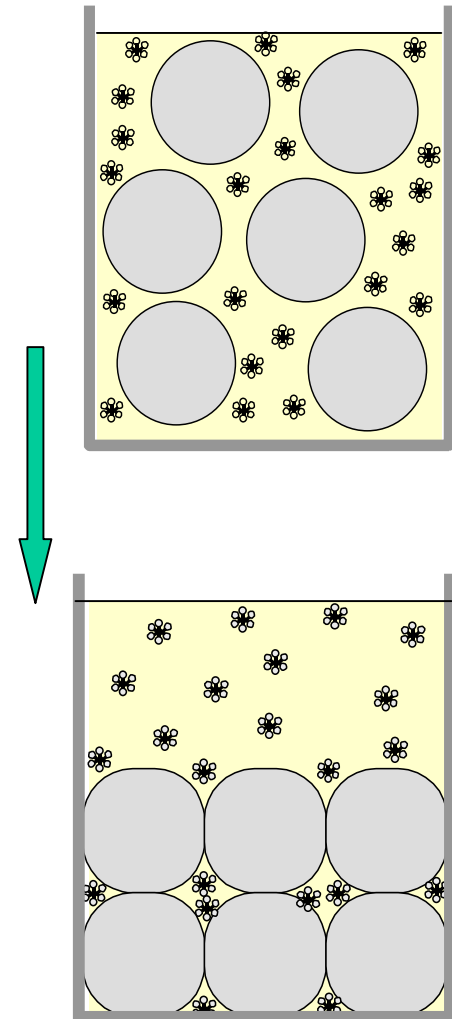
J.Bibette, D.Roux et al., *J.Phys.II France*, 1992

- ❖ Эти эмульсии не релаксируют после сжатия в контакте с мицеллярным раствором

M.P.Aronson, Н.М.Princen, *Nature*, 1980

- ❖ Спонтанная контракция (синерезис) под действием вытеснительного осмотического давления

A.Langefeld, *Ph Dissertation*, 1998



Вытеснительные силы в мицеллярных растворах

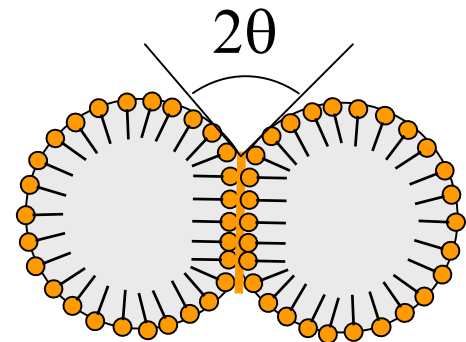
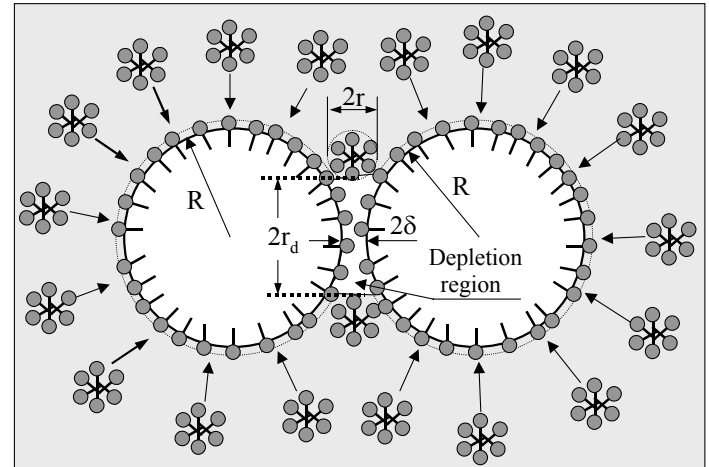
Характерные особенности :

- ❖ Критическая зависимость агрегативной устойчивости и реологических свойств от физико-химических параметров
 - концентрации ПАВ, C_s
 - концентрации электролитов, C_{el}
 - размера капель, R
 - температуры, T

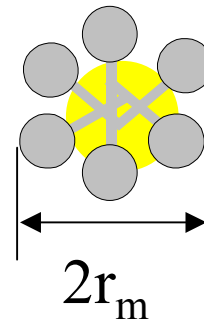
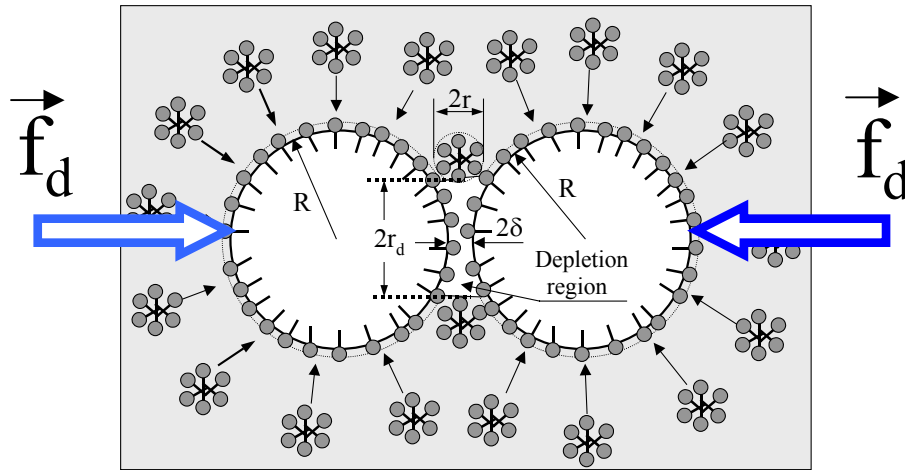
Н.М.Princen, J M.P.Aronson, *J.C.I.S.*, 1986 ;
M.P.Aronson, *Langmuir*, 1989 ;
J.Bibette, D.Roux et al., *J.Phys.II France*, 1992

- ❖ Аномально высокие контактные углы θ между каплями, зависимость θ от C_s , C_{el} , R , T

Н.М.Princen, J M.P.Aronson, *J.C.I.S.*, 1980 ;



Вытеснительные силы в мицеллярных растворах



$$C_m = (C_s - cmc) / N_{ag}$$

Пример : СДС

$$C_s = 5 \cdot 10^{-2} \text{ моль/л}$$

$$cmc = 5 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л}$$

$$N_{ag} \cong 50 \quad r_m \cong 3 \text{ нм}$$

$$\Pi_m \cong 2500 \text{ Па}$$

$$W_d \cong 20 \text{ кТ} \quad R = 1 \text{ мкм}$$

$$W_d \cong 2 \text{ кТ} \quad R = 0.1 \text{ мкм}$$

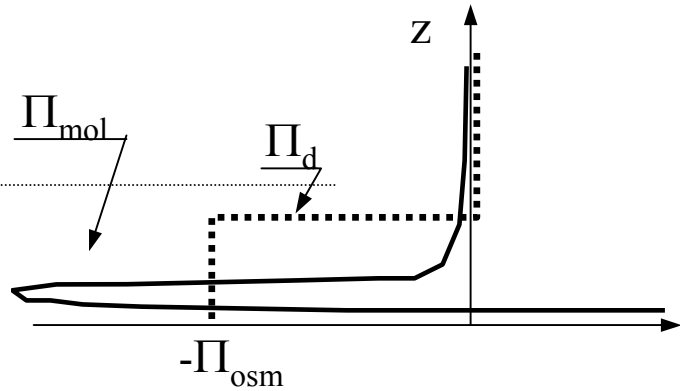
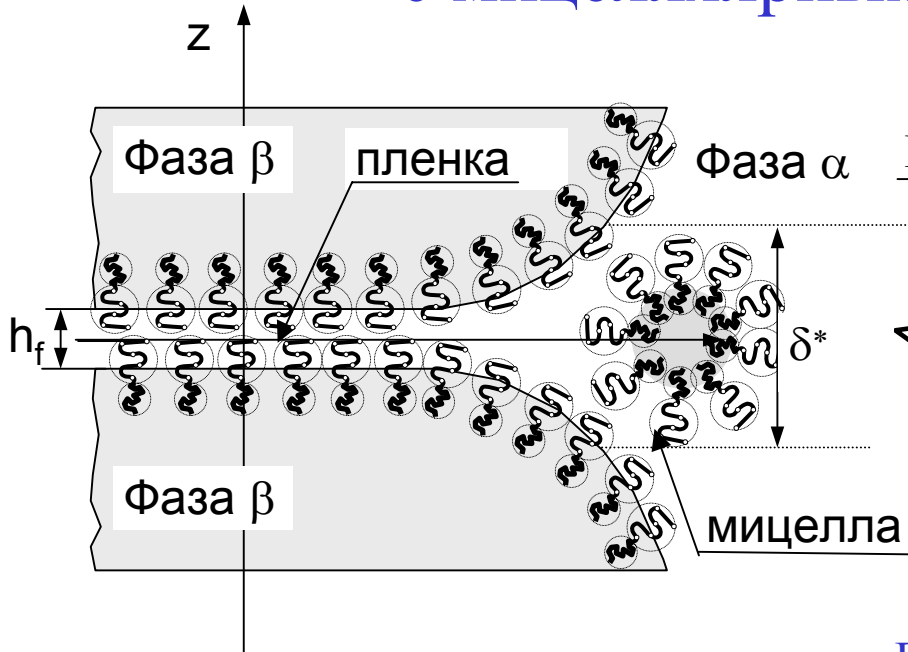
$$f_d = \Pi_m a_d$$

$$a_d = \pi r_d^2 \cong 2\pi (R + \delta) r_m$$

$$\Pi_m \cong C_m RT$$

$$W_d \cong f_d r_m$$

Термодинамика жидких пленок в равновесии с мицеллярными растворами



Расклинивающее давление, Π

$$f_{ad} \cong \pi R \Delta_{ad} \Omega$$

В частном случае

$$\Delta_{mol} \Omega \ll \Delta_d \Omega \quad \Pi_m < P_c$$

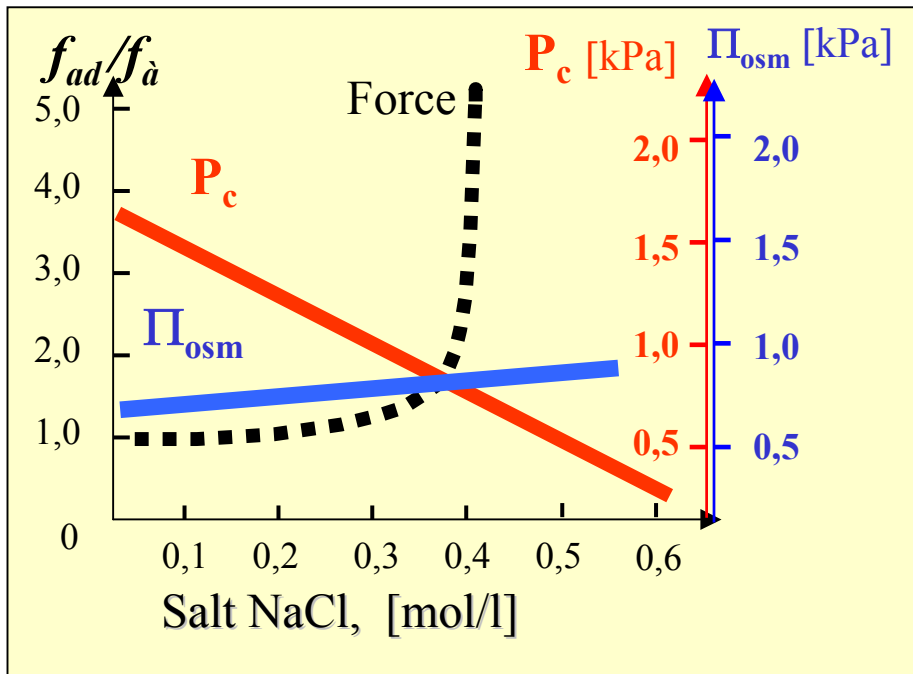
$$\Delta_{ad} \Omega = \Delta_{mol} \Omega + \Delta_d \Omega$$

$$\Delta_{mol} \Omega = \int_{h_f}^{\infty} \Pi dh$$

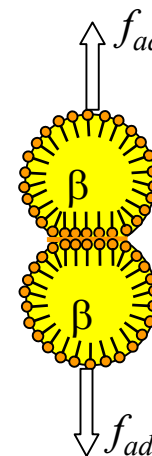
$$\Delta_d \Omega = -\Pi_m (\delta - h_f)$$

$$\theta \cong \sqrt{\frac{\Pi_m}{\sigma_o} (\delta - h_f)}$$

Влияние концентрации электролитов



V.G.Babak, M.J.Stebe,
J.D.S.T., 2002, N°1-2

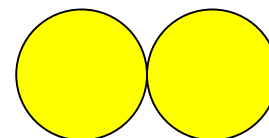


$$C_{\text{NaCl}} = 0$$

$$\sigma_s = 7,5 \text{ mN/m} \quad P_c = \frac{2\sigma_o}{R} \cong 1,5 \text{ kPa}$$

$$\Pi_{osm} < P_c$$

$$\Pi_{osm} \cong C_m RT \cong 0,9 \text{ kPa}$$



$$C_{\text{NaCl}} > 0,4 \text{ M}$$

$$\sigma_s = 4,5 \text{ mN/m} \quad P_c = \frac{2\sigma_o}{R} < 0,9 \text{ kPa}$$

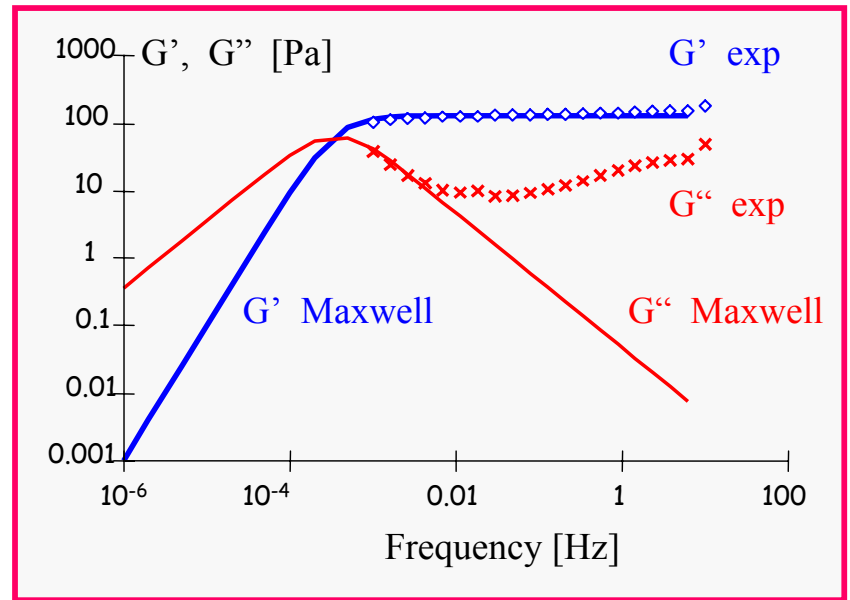
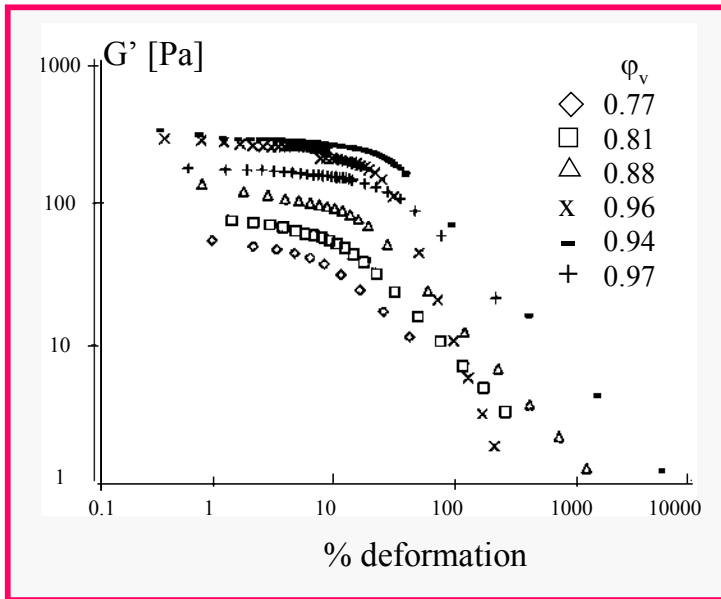
$$\Pi_{osm} > P_c$$

$$\Pi_{osm} \cong C_m RT > 0,9 \text{ kPa}$$



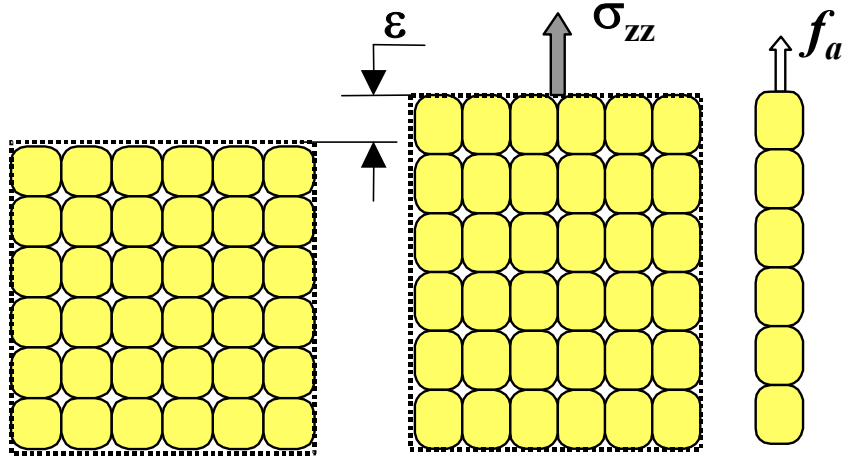
Вязкоэластические свойства

A. Langenfeld, Ph Dissertation, 1998



- ❖ Применимость модели Максвелла для описания реологических свойств при высоких скоростях сдвига
- ❖ Снижение модуля эластичности G' при увеличении T
- ❖ Увеличение модуля эластичности G' с ростом объемного содержания дисперсной фазы ϕ_v

Модель для оценки модуля эластичности высококонтцентрированных эмульсий



Известные реологические модели не объясняют влияния физико-химических факторов на предельные значения напряжения сдвига (σ_b) и деформации (ϵ_{max}) в таких эмульсиях

$$f_a \cong K \Delta$$

$$\sigma_{zz} \cong E \epsilon$$

$$K \cong 2\pi\sigma_o$$

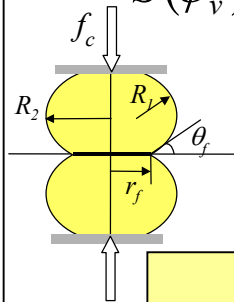
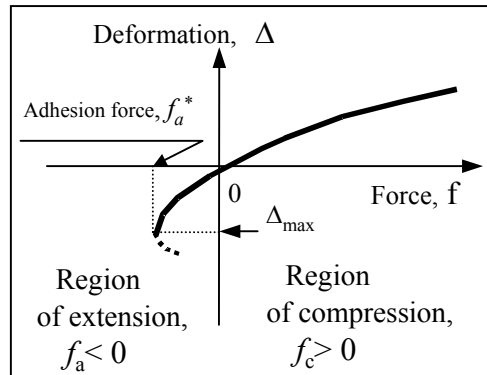
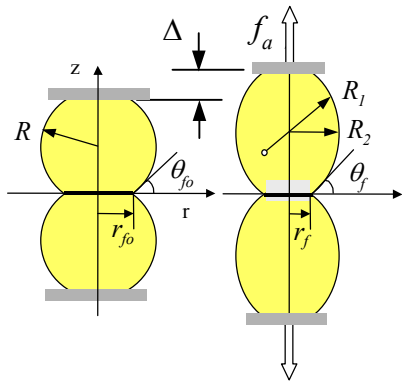
$$\epsilon \cong \Delta/2R$$

$$\sigma_{zz} \cong n_{\Sigma} f_a$$

$$n_{\Sigma} = S(\varphi_v)/(2R^2)$$

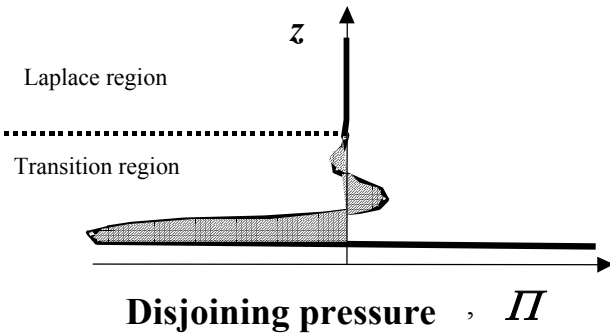
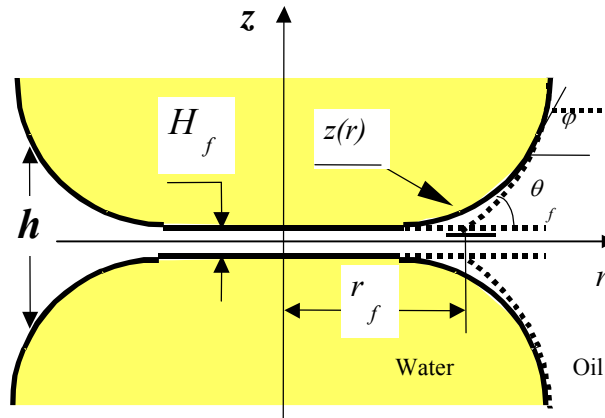
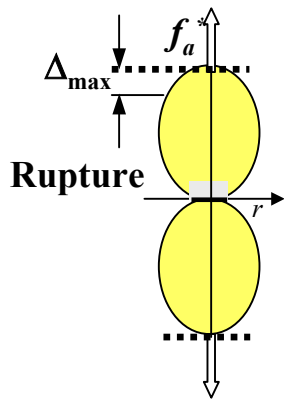
$$S(\varphi_v) = C\varphi_v^{1/3}(\varphi_v - \varphi_c)$$

$$E \cong 3G'$$



$$G' \cong 1.77 \left(\frac{\sigma_o}{R} \right) \varphi_v^{1/3} (\varphi_v - \varphi_c)$$

Оценка предельных значений напряжения сдвига и деформации в эмульсиях-гелях



$$\sigma_b \cong n_{\Sigma} f_a^*$$

$$f_a^* \cong \pi R \Delta_{ad} \Omega$$

$$\Delta_{ad} \Omega = \int_{H_f}^{\infty} \Pi(h) dh$$

$$\Delta_{ad} \Omega \cong 2 \sigma_o (\cos \theta_f - 1)$$

Предельное напряжение сдвига, σ_b

$$\sigma_b \cong f_a^* \frac{S(\varphi)}{(2R)^2} = \frac{\pi \Delta_{ad} \Omega}{4 R} S(\varphi)$$

Предельная деформация, ε_{\max}

$$\varepsilon_{\max} \cong \frac{f_a^*}{4\pi R \sigma_o} \cong \frac{1}{4} \frac{\Delta_{ad} \Omega}{\sigma_o}$$

$$\varepsilon_{\max} \cong \frac{1}{2} \sin^2 \theta_f \cong \frac{\theta_f^2}{2}$$

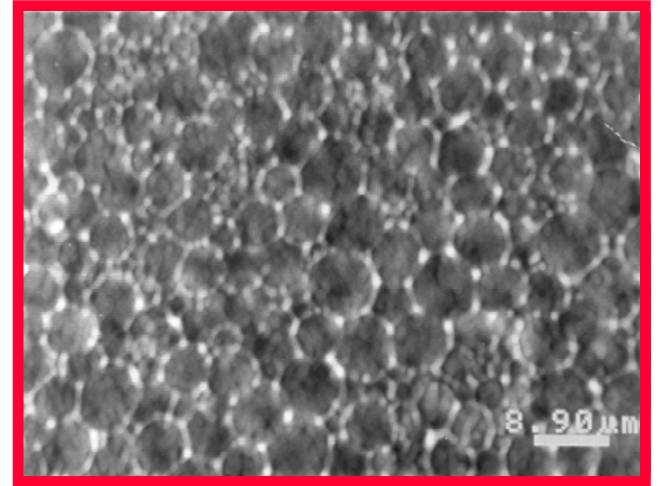
Предельное напряжение сдвига зависит от модуля эластичности и контактного угла



$$\sigma_b \cong G' \sin^2 \theta_f$$

Основные выводы

* Свойства эмульсий-гелей (устойчивость к разрушению, реологические свойства, и др) взаимосвязаны со структурой микроэмульсионных систем, образуемых молекулами ПАВ в тройных системах.



* Представляется актуальным систематическое теоретическое и экспериментальное изучение термодинамики и кинетики процессов самоорганизации молекул ПАВ в таких системах, а также свойств микроэмульсионных структур, в связи со свойствами эмульсий-гелей.