

А. В. Нуштаева

ИССЛЕДОВАНИЕ УТОНЧЕНИЯ ЭМУЛЬСИОННЫХ ПЛЕНОК, СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ, МЕТОДОМ ПРИЛОЖЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. Работа представляет результаты исследования пленок воды в масле методом приложенного перепада давлений PDT (pressure drop technique), который позволяет преодолеть капиллярное давление, возникающее в пленке, стабилизированной твердыми частицами, и получить более тонкие пленки.

Материалы и методы. В качестве твердого эмульгатора использовались твердые частицы гидроксида алюминия, модифицированные стеариновой кислотой. Приложенный перепад давлений ΔP измеряли с помощью U-образного водного манометра. Толщину пленок определяли кондуктометрическим методом.

Результаты. В первой серии экспериментов исследовали утончение пленки, наблюдающееся при постепенном повышении давления ΔP от 0 до 5 кПа с шагом в 1 кПа через 5 мин. Пленки утончались до квазиравновесной толщины $h_e = 24,2\text{--}29,8$ мкм (при $\Delta P = 1\text{--}4$ кПа). Без дополнительного давления равновесная толщина пленки составила 32 мкм. Во второй серии экспериментов исследовали утончение пленок при резком повышении давления до толщины прорыва пленок $h_r = 27,5\text{--}31,5$ (при $\Delta P = 1\text{--}4$ кПа).

Выводы. При постепенном нарастании давления достигнуты квазиравновесные пленки, толщина которых была меньше толщины прорыва пленок, полученных при резком увеличении давления. Неравновесные пленки разрывались при толщинах, соответствующих области перестройки упаковки твердых частиц внутри пленки.

Ключевые слова: твердые эмульгаторы, эмульсии, пленки, давление.

А. V. Nushtaeva

INVESTIGATION OF THINNING OF EMULSION FILMS STABILIZED BY SOLID PARTICLES VIA PRESSURE DROP TECHNIQUE

Abstract.

Background. The article describes the results of investigation of the water-in-oil films by the pressure drop technique (PDT). The method allows to overcome the capillary pressure arising in a solid-stabilized-film and to obtain a thin film.

Materials and methods. The solid particles of aluminum hydroxide, modified with stearic acid, were used as a solid emulsifier. An applied pressure drop ΔP was measured using a U-shaped water manometer. The film thickness was determined by the conductometric method.

Results. In the first series of experiments the film was thinning during a gradual increase in pressure ΔP from 0 up to 5 kPa in steps of 1 kPa for 5 minutes. Film thins to a quasi-equilibrium thickness $h_e = 24,2\text{--}29,8$ μm (at $\Delta P = 1\text{--}4$ kPa). Without additional pressure the equilibrium film thickness was equal to 32 μm . In the second series of experiments at a sharp increase in pressure ΔP the film was thinning to a rupture thickness $h_r = 27,5\text{--}31,5$ (at $\Delta P = 1\text{--}4$ kPa).

Conclusions. With a gradual increase of the pressure the author reached a quasi-equilibrium film thickness that was less than the thickness of the broken films ob-

tained with a sharp increase in the pressure. Non-equilibrium films were ruptured with thicknesses corresponding to the region of restructuring of the solid particles package inside the film.

Key words: solid emulsifier, emulsion, films, pressure.

Введение

Твердые частицы нерастворимых высокодисперсных порошков способны стабилизировать эмульсии, они называются твердыми стабилизаторами.

Многие бытовые и промышленные эмульсии содержат твердые стабилизаторы: косметические, лекарственные и дезинфицирующие препараты, некоторые пищевые эмульсии (майонез, маргарин, мороженое), дорожные (битумные) эмульсии, краски и т.д. Твердые частицы содержатся в нефтяных эмульсиях, образующихся при добыче и транспортировке нефти.

Эмульсии, стабилизированные твердыми частицами, обладают необычными свойствами в отличие от эмульсий, стабилизированных традиционными поверхностно-активными веществами (ПАВ): во-первых, они обладают чрезвычайно высокой устойчивостью в отношении коалесценции, во-вторых, проявляют необычное реологическое поведение [1–3]. В связи с этим эмульсии, стабилизированные твердыми частицами, в перспективе могут использоваться для создания новых материалов, например, макропористых аэрогелей или твердых пен [1].

Стабильность эмульсий определяется, во-первых, устойчивостью межфазного (адсорбционного) слоя эмульгатора на поверхности капель, во-вторых, устойчивостью эмульсионных пленок [4–10].

В реальных системах эмульсионная пленка – это жидкостная прослойка дисперсионной среды между каплями дисперсной фазы. Пленки, полученные вне эмульсий, называются модельными (или свободными, изолированными).

Существуют различные теоретические модели строения эмульсионных пленок, стабилизированных твердыми частицами [11, 12]: 1) монослойная пленка, содержащая один слой частиц, перекрывающих жидкостную прослойку как мостики [13, 14]; 2) бислойная пленка, содержащая два межфазных слоя частиц [11, 15, 16]; 3) полислойная пленка, в которой частицы образуют сетку-структуру, соединяющую два межфазных слоя [11].

Тип пленки определяется структурой межфазного слоя и зависит от концентрации частиц и величины краевого угла θ (угла избирательного смачивания твердой частицы водой и маслом).

Бислойная пленка формируется при достаточно большой концентрации частиц и оптимальном значении угла $\theta = 60\text{--}85^\circ$ (для прямых эмульсий, М/В) и $\theta = 95\text{--}120^\circ$ (для обратных эмульсий, В/М), когда капли покрыты плотным монослоем твердых частиц [11, 15, 16].

Рисунок 1 иллюстрирует формирование бислойной пленки. При столкновении эмульсионных капель на первом этапе формируется пленка, состоящая из двух межфазных слоев стабилизатора и прослойки дисперсионной среды между ними (рис. 1,а). Вытекание дисперсионной среды вызывает утончение пленки до контакта межфазных слоев частиц – образуется бислойная пленка со смешанной упаковкой (кубической между слоями, но гексагональной внутри слоев) (рис. 1,б). Следующий этап утончения – уплотнение упаковки между противоположными слоями, которое возможно при танген-

циальном смещении слоев относительно друг друга, т.е. происходит перестройка упаковки частиц внутри пленки (рис. 1, в). Заметим, что внутри межфазных слоев наиболее вероятна плотная гексагональная упаковка.

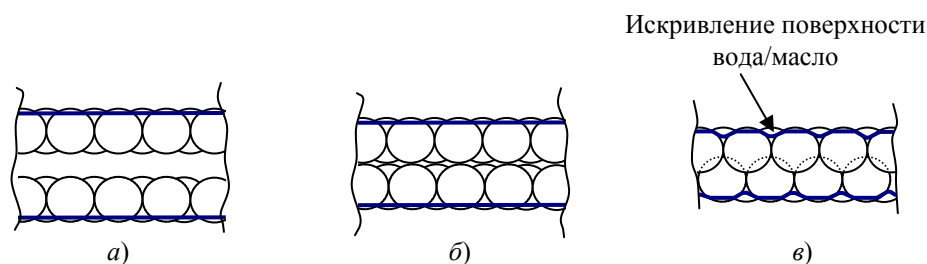


Рис. 1. Стадии утончения пленки, стабилизированной твердыми частицами: а – толстая пленка с прослойкой дисперсионной среды; б – бислойная пленка со смешанной упаковкой (кубической между слоями); в – бислойная пленка с плотной гексагональной упаковкой (стрелкой отмечен мениск вода/масло в поровом пространстве между частицами)

Независимо от модели дальнейшее утончение такой пленки приводит к искривлению поверхности вода/масло в поровом пространстве между частицами (отмечено стрелкой на рис. 1). Следовательно, в пленке возникает капиллярное давление P_σ [15], которое препятствует ее утончению.

Данная работа представляет результаты исследования свободных эмульсионных пленок воды в масле методом приложенного перепада давлений PDT (pressure drop technique) [17], который позволяет преодолеть возникающее капиллярное давление и получить более тонкие пленки.

Материалы и методы

Материалы. В качестве твердого эмульгатора использовались твердые частицы гидроксида алюминия, модифицированные стеариновой кислотой. Дисперсию $\text{Al}(\text{OH})_3$ получали методом выщелачивания раствора AlCl_3 при добавлении NaOH .

Раствор AlCl_3 в воде имеет кислую реакцию, а при добавлении щелочи до $\text{pH} > 5$ образуется золь гидроксида алюминия. Точка нулевого заряда частиц $\text{Al}(\text{OH})_3$ равна $\text{pH} = 6,7$ [18].

Модификация частиц стеариновой кислотой (условно HSt) протекает непосредственно на поверхности раздела вода/масло: молекулы кислоты HSt химически адсорбируются на поверхности $\text{Al}(\text{OH})_3$, образуя на межфазной поверхности стеарат алюминия (AlSt).

В данной работе AlSt получали при концентрации хлорида алюминия в воде $C_{\text{AlCl}_3} = 0,01\%$, $\text{pH} = 7,5$ и концентрации стеариновой кислоты в масле $C_{\text{HSt}} = 0,001\%$. Для увеличения электропроводности водной фазы добавляли KCl до концентрации 0,1 М с удельной электропроводностью $128,8 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

В качестве фазы масла использовали смесь октана и CCl_4 (в объемном соотношении 1:1). Плотность фазы масла $\rho = 1,14 \text{ г/см}^3$.

Методы. Адсорбционный слой твердых частиц формировали в бюксе с притертой крышкой. В бюкс наливали раствор стеариновой кислоты в мас-

ле, а сверху – водную дисперсию $\text{Al}(\text{OH})_3$. Твердые частицы самопроизвольно закреплялись на поверхности вода/масло, образуя межфазный слой. Для обеспечения закрепления частиц на поверхности водную фазу непрерывно перемешивали с помощью магнитной мешалки, не допуская эмульгирования.

Для получения свободных эмульсионных пленок использовалась методика вытягивания рамки из водной фазы в фазу масла через межфазную поверхность. По этой методике получали макроскопические вертикальные пленки в измерительной ячейке, которая представляла собой отверстие (диаметром 6,8 мм) в пористой стеклянной пластине ПОР 16.

Схема измерительной установки показана рис. 2. Ячейка 1, сконструированная из пористой пластины, соединена с системой, состоящей из трубок и делительной воронки 2, наполовину заполненной водой. При медленном (по каплям) вытекании воды из делительной воронки в воздушной системе возникало пониженное (по сравнению с атмосферным) давление ΔP , которое измеряли с помощью U-образного водного манометра 3. Капиллярное давление P_σ в пленке считалось равным приложенному давлению ΔP .

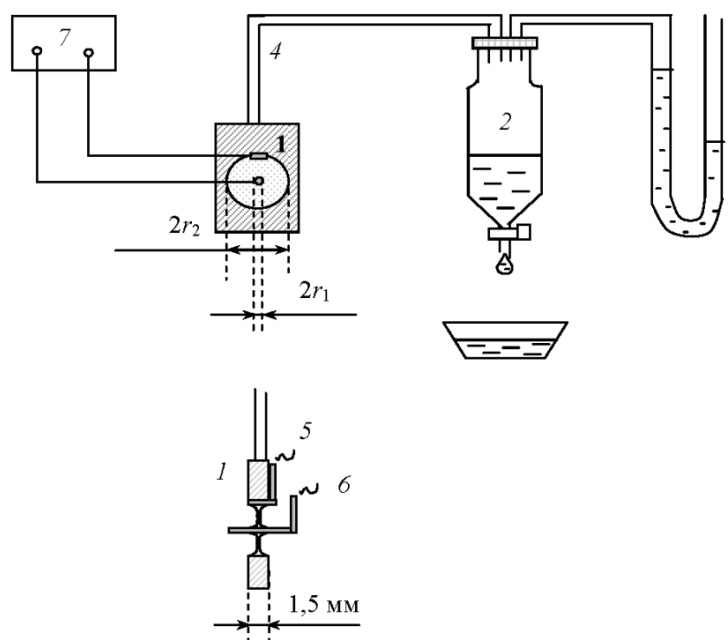


Рис. 2. Схема устройства для исследования электропроводности модельной пленки, утончающейся под влиянием приложенного перепада давлений

Под влиянием перепада давлений ΔP жидкость из пленки вытекала в пористую пластину 1, затем в стеклянную трубку 4, в результате чего пленка утончалась до квазиравновесной толщины h_e или толщины прорыва h_r . Толщину h_r определяли по последнему (перед прорывом) значению электропроводности, если равновесная электропроводность не устанавливалась.

Пленку пронизывали два электрода: 1) внешний электрод 5 – тонкая платиновая пластинка, прикрепленная в верхней части отверстия и, следовательно, сообщающаяся с внешним мениском; 2) внутренний электрод 6 – платиновая проволока, аналогично пронизывающая центр пленки. Радиусы

электродов, включая мениски: $r_2 = 3,2 \pm 0,2$ мм и $r_1 = 0,28 \pm 0,05$ мм – определяли с помощью катетометра. Толщину водных пленок определяли кондуктометрическим методом с помощью кондуктометра ОК-1 (7 на рис. 2).

В момент вытягивания рамки пленка состоит из двух межфазных слоев частиц с прослойкой водной среды между ними и утончается до контакта межфазных слоев: образуется бислойная пленка. При этом электропроводность пленки κ_f снижается и достигает квазиравновесного значения $\kappa_{f(e)}$ (выходит на плато). Равновесному значению электропроводности соответствует равновесная толщина пленки h_e , которая равна

$$h_e = \kappa_{f(e)} \ln(r_2/r_1) nB / (2\pi\kappa_{sp}), \quad (1)$$

где κ_{sp} – удельная электропроводность водной фазы; n – кратность пленки (зависит от краевого угла θ и типа упаковки твердых частиц в адсорбционном слое); B – эмпирический коэффициент.

Толщина h , рассчитанная из электропроводности κ_f , будет зависеть от того, какую модель пленки принимаем. Для бислойной модели множитель nB изменяется от 2,78 ($\theta = 0-16^\circ$) до 5,06 ($\theta = 88-89^\circ$). В данной работе множитель $nB = 3,5$ для угла $\theta = 43^\circ$, измеренного в [19].

Если предполагать, что межфазный слой содержит несколько слоев плотноупакованных сферических частиц (или их агрегатов) – полислойная модель пленки, – множитель nB равен 2,78–3,12 (в зависимости от плотности упаковки между слоями) [20].

Неравновесная толщина утончающейся пленки, состоящей из двух межфазных слоев и прослойки водной среды, равна:

$$h = h_w + 2h_s; \quad (2)$$

$$h_s = R(1 + \cos\theta), \quad (3)$$

где h_w – толщина жидкостной прослойки, определяемая из разности ($\kappa_f - \kappa_{f(e)}$) при $nB = 1$; h_s – толщина межфазного слоя; R – радиус частиц; θ – избирательный угол смачивания твердых частиц. В случае бислойной пленки: $2h_s = h_e$.

С помощью (2) была построена калибровочная кривая $\kappa_f(h)$, по которой и определяли толщину неравновесных пленок.

Результаты

Прямые эмульсии получались при отношении $\frac{C_{\text{HST}}}{C_{\text{AlCl}_3}} \leq 1-1,5$ (методом встряхивания при добавлении масла по каплям к воде); обратные эмульсии – при $\frac{C_{\text{HST}}}{C_{\text{AlCl}_3}} \geq 0,2$ (путем добавления воды по каплям к маслу).

Сама стеариновая кислота не стабилизирует эмульсии в отсутствие твердых частиц $\text{Al}(\text{OH})_3$. Из дисперсии $\text{Al}(\text{OH})_3$ без стеариновой кислоты получается устойчивая прямая эмульсия.

В области прямых эмульсий получены устойчивые макроскопические эмульсионные пленки воды в масле. Время жизни пленок составляло от нескольких минут до часа. Пленки были полностью покрыты частицами, свободных от частиц участков (которые выдает интерференция) не наблюдалось.

Кроме оптимального состава эмульгатора, для получения и исследования пленок при ΔP было необходимо выполнение дополнительных условий: 1) при вытягивании рамки должен сразу возникать контакт межфазных слоев (если возникал мениск, то при вытекании жидкости частицы межфазных слоев «стекали» по поверхности на периферию); 2) межфазные слои должны быть двумерно структурированы, но в то же время внутренняя среда пленки не должна образовывать гель (в противном случае при давлении ΔP происходило сжатие внутреннего геля, но не утончение).

В первой серии экспериментов исследовали утончение пленки, наблюдающееся при постепенном повышении давления ΔP от 1 до 5 кПа (0,01–0,05 атм) с шагом в 1 кПа (0,01 атм) через 5–7 мин. Результаты этих измерений показаны на рис. 3.

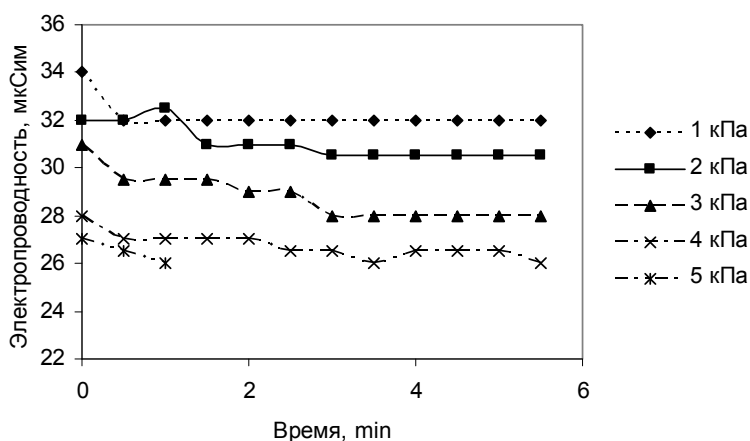


Рис. 3. Уменьшение электропроводности эмульсионной водной пленки вследствие утончения под действием приложенного перепада давлений ΔP (от 1 до 5 кПа)

Уменьшение электропроводности связано с утончением пленок. Как видно из рис. 3, при низких значениях ΔP пленки уже за 1–5 мин утончались до квазиравновесной толщины h_e , которая составила 29,8 мкм (для $\Delta P = 1$ кПа), 28,4 мкм ($\Delta P = 2$ кПа), 26 мкм ($\Delta P = 3$ кПа) и 24,2 мкм ($\Delta P = 4$ кПа).

Причем, начиная с $\Delta P = 2$ кПа, замечен ступенчатый характер утончения, что объясняется уплотнением частиц в межфазных слоях.

На кривой 2 можно отметить резкое утолщение на первом этапе. Подобные скачки электропроводности (и соответственно толщины) наблюдались при механических воздействиях. Это говорит о том, что «подсушенная» пленка может восстанавливаться, поглощая воду.

При давлении $\Delta P = 5$ кПа уже через 1 мин произошел прорыв пленки. Квазиравновесная толщина не была достигнута. Следует подчеркнуть, что диаметр пор стеклянной ячейки (16 мкм) позволял создать перепад давлений не более 5 кПа. При таком давлении уже наблюдался проскок капель масла из ячейки внутрь стеклянной трубки.

Такая же пленка без давления только под влиянием гравитации утончалась до $h_e = 32$ мкм за 30 мин. Из равновесной толщины пленки можно рассчитать эффективный радиус частиц $R^{\text{эф}}$ в предположении бислойной модели, используя (3). Так, из толщины $h_e = 32$ и угла $\theta_w = 43^\circ$ получаем $R^{\text{эф}} = 9,4$ мкм.

Определение размеров частиц с помощью микроскопа непосредственно на поверхности вода/масло показало, что частицы, конечно же, полидисперсны. Большинство частиц имеют радиус в пределах 3–7 мкм, хотя радиус некоторых достигает 20–30 мкм. Таким образом, значение $R^{\text{эф}}$ соответствует реальной области распределения частиц по размерам.

Хотя бислойная пленка – это всего лишь модель, однако она хорошо согласуется с экспериментальными данными. Так, например, для пленок, полученных из частиц кремнезема, эффективные радиусы агрегатов $R_{\text{агр}}^{\text{эф}}$, рассчитанные из h_e , и радиусы $R_{\text{агр}}$, найденные седиментационным анализом, имеют одинаковые значения [3].

Во второй серии экспериментов при определенном давлении ΔP электропроводность измерялась непрерывно вплоть до прорыва пленки. Время утончения уменьшалось от 35–60 мин (для $\Delta P = 0$ –1 кПа) до 1–5 мин (для $\Delta P = 3$ –5 кПа). На рис. 4 представлены толщины прорыва пленок h_r и теоретические изотермы капиллярного давления для двух типов упаковки частиц противоположных межфазных слоев, рассчитанные в работе [9].

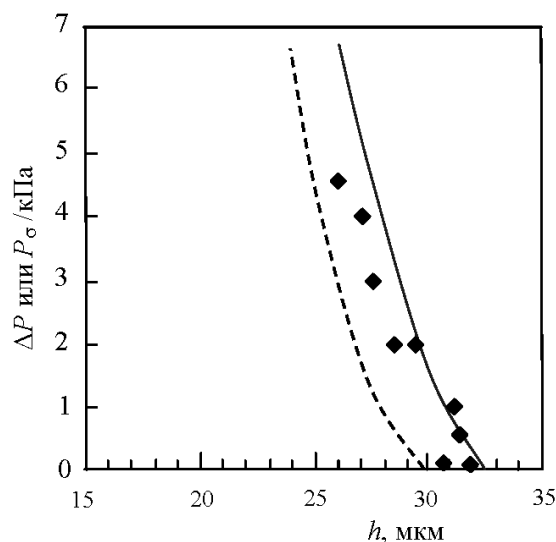


Рис. 4. Теоретические изотермы капиллярного давления $h(P_\sigma)$ для идеально гексагональной упаковки частиц в пленке (сплошная кривая) и для кубической упаковки частиц противоположных слоев (пунктирная кривая) и экспериментальные толщины прорыва h_r эмульсионных водных пленок при соответствующем приложенном давлении ΔP (ромбы)

Сравнение результатов первой и второй серий измерений (табл. 1) показывает, что равновесные толщины h_e , полученные при постепенном нарастании ΔP (и, следовательно, медленном утончении), во всех случаях меньше, чем значения толщины прорыва h_r , достигнутые при быстром утончении пленок.

Кроме того, как видно из рис. 4, пленки разрывались при толщинах, соответствующих области перестройки упаковки. В связи с этим можно предположить, что при увеличении капиллярного давления в пленке упаковка частиц становится более плотной, происходит перестройка упаковки с куби-

ческой на идеально гексагональную как между противоположными межфазными слоями, так и внутри самих слоев.

Таблица 1

Толщины равновесных пленок h_e и толщины прорыва пленок h_r , соответствующие давлению ΔP

ΔP , кПа	1	2	3	4	4,5
h_e , мкм	29,8	28,4	26	24,2	—
h_r , мкм	31,5	28,5–29,5	28	27,5	26,5

Заключение

Метод приложенного перепада давлений ограниченно применим для пленок, стабилизированных твердыми частицами. При постепенном нарастании давления достигнуты квазиравновесные пленки, толщина которых была меньше толшины прорыва пленок, полученных при резком увеличении давления. Неравновесные пленки разрывались при толщинах, соответствующих области перестройки упаковки твердых частиц внутри пленки.

Список литературы

1. **Arditty, S.** Materials based on solid-stabilized emulsions / S. Arditty, V. Schmitt, J. Giermanska-Kahn, F. Leal-Calderon // *J. Colloid Interface Sci.* – 2004. – Vol. 275. – P. 659–664.
2. **Tcholakova, S.** Comparison of solid particle, globular proteins and surfactants as emulsifiers / S. Tcholakova, N. D. Denkov, A. Lips // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2008. – Vol. 10. – P. 1608–1627.
3. **Нуштаева, А. В.** Влияние структурообразования в водной фазе на свойства модельных эмульсионных пленок, стабилизированных твердыми микрочастицами / А. В. Нуштаева, А. А. Шумкина, П. М. Кругляков, С. И. Еланева // *Коллоид. журн.* – 2011. – Т. 73, № 6. – С. 826–834.
4. **Tadros, Th. F.** Emulsion stability / Th. F. Tadros, B. Vincent // *Encyclopedia of Emulsion Technology* / ed. P. Becher, M. Dekker. – N. Y., 1983. – P. 129.
5. **Levine, S.** Stabilization of emulsions by fine particles. I. Partitioning of particles between continuous phase and oil/water interface / S. Levine, B. D. Bowen, S. J. Partridge // *Colloids and Surfaces.* – 1989. – Vol. 38. – P. 325–344.
6. **Levine, S.** Stabilization of emulsions by fine particles. II. Capillary and Waals forces between particles / S. Levine, B. D. Bowen, S. J. Partridge // *Colloids and Surfaces.* – 1989. – Vol. 38. – P. 345–364.
7. **Aveyard, R.** Liquid droplets and solid particles at surfactant solution interfaces / R. Aveyard, J. H. Clint // *J. Chem. Soc., Faraday Trans.* – 1995. – Vol. 91, № 17. – P. 2681–2697.
8. **Kruglyakov, P. M.** Hydrophile-lipophile balance of surfactants and solid particles / P. M. Kruglyakov // *Physicochemical aspects and applications.* – Amsterdam : Elsevier Science, 2000. – 520 с.
9. **Kruglyakov, P. M.** Emulsion stabilized by solid particles: influence of the capillary pressure / P. M. Kruglyakov, A. V. Nushtaeva // *Emulsions: Structure, Stability and Interactions* / ed. D. N. Petsev. – Amsterdam : Elsevier, 2004. – P. 641–676.
10. **Kaptay, G.** On the equation of the maximum capillary pressure induced by solid particles to stabilize emulsions and foams and on the emulsion stability diagrams / G. Kaptay // *Colloids and Surfaces.* – 2006. – Vol. 282–283. – P. 387–401.
11. **Horosov, S.** Foams and foam films stabilised by solid particles / S. Horosov // *Current Opinion in Colloid and Interface Science.* – 2008. – Vol. 13. – P. 134–140.

12. **Нуштаева, А. В.** Эмульсии, стабилизированные твердыми частицами : моногр. / А. В. Нуштаева. – М. : Инфра-М, 2014. – 320 с.
13. **Denkov, N. D.** Lateral capillary forces and two-dimensional arrays of colloid particles and protein molecules / N. D. Denkov, P. A. Kralchevsky, I. B. Ivanov // *J. Dispersion Science and Technology*. – 1997. – Vol. 18, № 6–7. – P. 577–591.
14. **Velikov, K. P.** Direct observation of the dynamics of latex particles confined inside thinning water-air films / K. P. Velikov, F. Durst, O. D. Velev // *Langmuir*. – 1998. – Vol. 14, № 5. – P. 1148–1155.
15. **Нуштаева, А. В.** Капиллярное давление в утончающейся эмульсионной пленке, стабилизированной твердыми частицами / А. В. Нуштаева, П. М. Кругляков // Коллоид. журн. – 2003. – Т. 65, № 3. – С. 374–382.
16. **Alargova, R. G.** Foam superstabilization by polymer microrods / R. G. Alargova, D. S. Warhadpande, V. N. Paunov, O. D. Velev // *Langmuir*. – 2004. – Vol. 20. – P. 10371–10374.
17. **Кругляков, П. М.** Пена и пенные пленки / П. М. Кругляков, Д. Эксерова. – М. : Химия, 1990. – 400 с.
18. **Kosmulski, M.** The pH-dependent surface charging and the point of zero charge / M. Kosmulski // *J. Colloid Interface Sci.* – 2002. – Vol. 253. – P. 77–87.
19. **Кругляков, П. М.** Гидрофильно-олеофильное соотношение высокодисперсных твердых эмульгаторов / П. М. Кругляков, С. М. Селицкая, Т. В. Микина // Изв. сиб. отд. АН СССР. Сер. хим. наук. – 1983. – Вып. 1. – С. 40–45.
20. **Нуштаева, А. В.** Полислоная модель пленки, стабилизированной твердыми частицами / А. В. Нуштаева, А. А. Шумкина, Н. В. Волкова // Известия ПГПУ им. В. Г. Белинского. – 2012. – № 29. – С. 352–357.

References

1. Arditty S., Schmitt V., Giermanska-Kahn J., Leal-Calderon F. *J. Colloid Interface Sci.* 2004, vol. 275, pp. 659–664.
2. Tcholakova S., Denkov N. D., Lips A. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2008, vol. 10, pp. 1608–1627.
3. Nushtaeva A. V., Shumkina A. A., Kruglyakov P. M., Elaneva S. I. *Kolloid. zhurn.* [Colloid journal]. 2011, vol. 73, no. 6, pp. 826–834.
4. Tadros Th. F., Vincent B. *Encyclopedia of Emulsion Technology*. Ed. P. Becher, M. Dekker. New York, 1983, p. 129.
5. Levine S., Bowen B. D., Partridge S. J. *Colloids and Surfaces*. 1989, vol. 38, pp. 325–344.
6. Levine S., Bowen B. D., Partridge S. J. *Colloids and Surfaces*. 1989, vol. 38, pp. 345–364.
7. Aveyard R., Clint J. H. *J. Chem. Soc., Faraday Trans.* 1995, vol. 91, no. 17, pp. 2681–2697.
8. Kruglyakov P. M. *Physicochemical aspects and applications*. Amsterdam: Elsevier Science, 2000, 520 p.
9. Kruglyakov P. M., Nushtaeva A. V. *Emulsions: Structure, Stability and Interactions*. Ed. D. N. Petsev. Amsterdam: Elsevier, 2004, pp. 641–676.
10. Kaptay G. *Colloids and Surfaces*. 2006, vol. 282–283, pp. 387–401.
11. Horosov S. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. 2008, vol. 13, pp. 134–140.
12. Nushtaeva A. V. *Emul'sii, stabilizirovannye tverdymi chastitsami: monogr.* [Emulsions stabilized by solid particles: monograph]. Moscow: Infra-M, 2014, 320 p.
13. Denkov N. D., Kralchevsky P. A., Ivanov I. B. *J. Dispersion Science and Technology*. 1997, vol. 18, no. 6–7, pp. 577–591.
14. Velikov K. P., Durst F., Velev O. D. *Langmuir*. 1998, vol. 14, no. 5, pp. 1148–1155.
15. Nushtaeva A. V., Kruglyakov P. M. *Kolloid. zhurn.* [Colloid journal]. 2003, vol. 65, no. 3, pp. 374–382.
16. Alargova R. G., Warhadpande D. S., Paunov V. N., Velev O. D. *Langmuir*. 2004, vol. 20, pp. 10371–10374.
17. Kruglyakov P. M., Ekserova D. *Pena i pennye plenki* [Foams and foam films]. Moscow: Khimiya, 1990, 400 p.

18. Kosmulski M. *J. Colloid Interface Sci.* 2002, vol. 253, pp. 77–87.
19. Kruglyakov P. M., Selitskaya S. M., Mikina T. V. *Izv. sib. otd. AN SSSR. Ser. khim. nauk* [Proceedings of Siberian department of the USSR Academy of Sciences. Series: chemical sciences]. 1983, iss. 1, pp. 40–45.
20. Nushtaeva A. V., Shumkina A. A., Volkova N. V. *Izvestiya PGPU im. V. G. Belinskogo* [Proceedings of Penza State Pedagogical University named after V.G. Belinsky]. 2012, no. 29, pp. 352–357.

Нуштаева Алла Владимировна

кандидат химических наук, доцент,
кафедра физики и химии, Пензенский
государственный университет
архитектуры и строительства
(Россия, г. Пенза, ул. Г. Титова, 28)

E-mail: nushtaeva.alla@yandex.ru

Nushtaeva Alla Vladimirovna

Candidate of chemical sciences, associate
professor, sub-department of physics
and chemistry, Penza State University
of Architecture and Construction
(28 G. Titova street, Penza, Russia)

УДК 544.77.051.12

Нуштаева, А. В.

Исследование утончения эмульсионных пленок, стабилизированных твердыми частицами, методом приложенного перепада давлений / А. В. Нуштаева // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. – 2014. – № 1 (5). – С. 73–82.