

УДК 544.33:544.34

СТАБИЛЬНОСТЬ ОБЪЕМНЫХ НАНОПУЗЫРЕЙ С ГИДРАТНЫМ СЛОЕМ

© 2025 г. Ю. К. Левин*

*Институт прикладной механики РАН (ИПРИМ РАН),
Ленинградский просп., д.7, стр.1, Москва, 125040 Россия*

** e-mail: iam-ras@mail.ru*

Поступила в редакцию 24.09.2024 г.

После доработки 05.11.2024 г.

Принята к публикации 17.11.2024 г.

Рассмотрена стабилизация объемных нанопузырей при балансе на их границе давления Лапласа за счет поверхностного натяжения и электростатического давления за счет кулоновских сил. Учтено наличие гидратного слоя толщиной ~ 1 нм с касательной ориентацией диполей воды вокруг него, низкая диэлектрическая проницаемость которого, примерно равная 3, повышает давление на границе нанопузыря. Определены размеры и заряд стабильного нанопузыря. Показано, что в соленой воде гидратный слой независимо от заряда нанопузыря повышает давление на его границе почти в 30 раз, а в пресной – от 10 до 4 раз.

Ключевые слова: диэлектрическая жидкая среда, кулоновское и лапласовское давление, аномальная диэлектрическая проницаемость, размер и заряд нанопузырей

STABILIZATION OF BULK NANOBUBBLES WITH A HYDRATE LAYER

© 2024 г. Yu. K. Levin

The stabilization of bubble nanobubbles is considered with the balance of the Laplace pressure at their boundary due to surface tension and electrostatic pressure due to Coulomb forces. The presence of a hydrate layer of thickness ~ 1 nm with a tangential orientation of water dipoles around it is taken into account, the low permittivity of which, approximately equal to 3, increases the pressure at the nanobubble boundary. The sizes and charge of a stable nanobubble are determined. It is shown that in salt water, the hydration layer, regardless of the charge of the nanobubble, increases the pressure at its boundary by almost 30 times, and in fresh water - several times less.

Keywords: dielectric liquid medium, Coulomb and Laplace pressure, hydration layer, anomalous permittivity, size and charge of nanobubbles.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к объемным нанопузырям (ОНП) в воде связан с перспективами их применения в различных областях [1–30]. Различают поверхностные нанопузыри (ПНП) и объемные (ОНП). Основное различие между ними в том, что первый неподвижен, а второй подвижен. Нанопузырьковые технологии широко востребованы для решения проблем изменения климата, охраны окружающей среды, снижения затрат и энергопотребления в таких промышленных процессах, как флотация, аэрация и озонирование, которые способны устранять загрязняющие вещества и цвет, дезинфекцию воды и окисление органических загрязняющих веществ. Также с помощью ОНП решаются проблемы экологии, сельского хозяйства, в медицине/биомедицинские, при оптимизации терапевтических и диагностических методов и других областей благодаря их малому размеру, большой удельной площади поверхности, длительному времени пребывания в воде, высокой мощности массопереноса, высокому дзета-потенциалу [3]. Применение ОНП при очистке коммерческих и бытовых сточных вод вместо ранее использовавшихся биологических подходов снижает затраты энергии, повышает эффективность, исключает дорогие химикаты и многоступенчатую обработку [6]. Поэтому исследование свойств ОНП, в том числе их стабильности, актуально, чем объясняется широкое обсуждение этого вопроса в литературе.

Эксперименты по обнаружению ПНП с помощью атомно-силовой микроскопии можно считать уже доказанным, но существование ОНП, которое пытаются доказать методами Dynamic light scattering [1], все еще открыто для обсуждения; однако есть веские указания на их существование [19]. ОНП генерируют с использованием замены растворителя, изменения температуры, гидродинамической кавитации и электролиза [4].

Для практического применения ОНП должны быть стабильными, т.е. иметь большие времена жизни. Механизм обеспечения стабильности широко обсуждался в литературе [21–24]. При гидродинамическом подходе с учетом возможной коалесценции соседних

ОНП найдено, что газы, растворенные в электролите, ингибируют коалесценцию ОНП с учетом уменьшения силы притяжения между ними. Так же, но в меньшей степени влияет градиент поверхностного натяжения при слиянии пузырьков (эффект Гиббса-Марангони) [21,22]. Отмечалось влияние и гидратации ионов [23]. Более широко распространен электростатический подход [1, 2, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 16, 17, 20, 24–31], при котором обычно полагают, что стабильность ОНП обеспечивается тем, что кулоновское P_0 и лапласовское P_L давления, действующие на границу ОНП, уравниваются друг друга. Давление газа внутри ОНП не учитывается, т.к. оно на порядки меньше давлений P_C и P_L во всем диапазоне размеров ОНП. Понятно, что стабильность ОНП имеет термодинамический характер и ее нельзя рассматривать в отрыве от их гомогенной генерации, деления и коалесценции. В работе [28] определены области значений заряда и радиуса, где ОНП устойчивы, коалесцируют и делятся. В работе [29] проведен термодинамический анализ их гомогенной генерации ОНП в пересыщенном водном растворе, вычислены минимальная работа образования и радиус критических зародышей, выведены условия стабильности ОНП. В работе [30] показано, что гомогенная генерация ОНП обусловлена минимизацией энергии Гиббса газожидкостной дисперсной системы. Отметим, что обычно использовалась модель одиночного заряженного пузыря в однородном жидком диэлектрике, которая была уточнена в [31] гипотезой о наличии гидратной оболочки ОНП с толщиной $\Delta \sim 1$ нм и относительная диэлектрической проницаемостью (ОДП) воды $\epsilon = 3$ с касательной ориентацией диполей. Это объяснялось экономией энергии водородных связей диполей воды в «касательной» структуре оболочки по сравнению с энергией их поляризационной ориентации в предполагаемой ранее «радиальной» структуре. Основанием для этой гипотезы послужили известные результаты метода молекулярной динамики [34] где сказано, что молекулы стремятся сохранять максимальное количество водородных связей, «силы упаковки» создают плотный слой в контакте с поверхностью.

Направления дипольных моментов \mathbf{p} выравниваются в приповерхностном слое в касательном направлении. Причем ориентацию вектора поляризации диполя определяет водородная связь, а не электрическое поле. Кроме того, сканирующая диэлектрическая микроскопия локальной емкости воды между атомарно плоскими стенками [32] обнаружила вблизи заряженного электрода межфазный Δ -слой ($\Delta \sim 1$ нм, $\epsilon = 3$). Из работы [33] известно, что вблизи границы раздела сред вода упорядочена слоями, простирающимися на несколько молекулярных диаметров от этой границы. Причем ориентацию вектора поляризации диполя определяет водородная связь, а не электрическое поле. В работе [35] также показано, что вода проявляет четкую слоистую структуру вблизи всех поверхностей, независимо от их гидрофильности в пределах $\Delta \approx 1$ нм от электрода. Поскольку закон экономии энергии универсален, не зависит от формы поверхности, вблизи которой он реализуется, то его действие у протяженных заряженных поверхностей [32–35] справедливо применить и к сферической поверхности ОНП [31]. Возможно, косвенным экспериментальным подтверждением наличия у ОНП электрически «мертвой» оболочки можно считать их повышенную стабильность. Расчеты в [36] сил Ван-дер-Ваальса при зарегистрированных устойчивых пузырьках приводят к выводу об особенности межфазных свойств на границе ОНП, что также служит косвенным подкреплением вывода [31] о наличии гидратной оболочки ОНП. Уточненная модель использована в [37] при анализе характеристик стабильного ОНП, где найдены условия существования его слоя Штерна. В [38] сообщается о повышении стабильности за счет уменьшения емкости ОНП Δ -слоем.

Как отмечено выше, стабильность ОНП обычно считают обеспеченной балансом кулоновского давления на границе ОНП (далее – давление ОНП):

$$P_c(r_0) = \frac{q_0^2}{32\pi^2 \epsilon_0 \epsilon r_0^4} \quad (1)$$

и давления Лапласа:

$$P_L(r_0) = 2\alpha / r_0, \quad (2)$$

где r_0 и q_0 – радиус и заряд ОНП, соответственно; $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ – диэлектрическая

проницаемость вакуума; $\alpha = 0.072 \text{ Н/м}$ – коэффициент поверхностного натяжения воды.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Отметим, что формула (1) справедлива для однородной диэлектрической среды. Однако, как отмечено выше, на границе ОНП формируется гидратный Δ -слой ($\Delta \approx 1 \text{ нм}$, $\epsilon_1 \approx 3$) полярных молекул воды с касательной ориентацией вектора поляризации. За пределами Δ -слоя ОДП воды возвращается к обычному значению $\epsilon_2 \approx 80$ (Рис. 1). Поэтому уточним формулу (1) с учетом влияния гидратного Δ -слоя и концентрации растворенных солей c .

Рис. 1. Структура оболочки объемного нанопузыря

2. АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ НАНОПУЗЫРЕЙ В ВОДЕ

Сферическая система с двухслойным диэлектриком подобна двум последовательно соединенным конденсаторам емкостью C_1 и C_2 [39]. Для ОНП с радиусом r_0 у внутреннего конденсатора радиусы обкладок r_0 и $r_0 + \Delta$, ОДП $\epsilon_1 \approx 3$, а у внешнего ($r_0 + \Delta$) и $(r_0 + \Delta + L)$ и ОДП $\epsilon_2 \approx 80$, где: $L = \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_2 k_B T / 2e^2 N_A c}$ – длина Дебая, м; $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана; $N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ – число Авогадро; $T = 293 \text{ К}$ – температура, c – концентрация раствора солей, моль/м^3 ; $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – элементарный заряд.

Емкости конденсаторов $C_1 = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_1\left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_0 + \Delta}\right)^{-1}$, $C_2 = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_2\left(\frac{1}{r_0 + \Delta} - \frac{1}{r_0 + \Delta + L}\right)^{-1}$,

соответственно. Общая емкость определяется известной формулой:

$$C(r_0) = 4\pi\varepsilon_0 \left[\frac{1}{\varepsilon_1} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_0 + \Delta} \right) + \frac{1}{\varepsilon_2} \left(\frac{1}{r_0 + \Delta} - \frac{1}{r_0 + \Delta + L} \right) \right]^{-1}. \quad (3)$$

Определим электростатическое давление ОНП $P_C(r_0)$ в жидком диэлектрике ($\varepsilon_2 = 80$) без Δ -слоя и давление $P(r_0)$ для ОНП с Δ -слоем. Энергия каждого из вариантов ОНП имеет вид $U = q_0^2/2C$. Давление для ОНП при $\Delta = 0$ равно [40]:

$$P_C(r_0) = -\frac{\partial U}{\partial r_0} \frac{1}{4\pi r_0^2} = -\frac{q_0^2}{8\pi r_0^2} \frac{\partial}{\partial r_0} \left(\frac{1}{C} \right) = \frac{q_0^2 (L + 2r_0)L}{32\pi^2 \varepsilon_0 \varepsilon_2 r_0^4 (L + r_0)^2}, \quad (4)$$

где емкость $C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_2 r_0(1 + r_0/L)$. Аналогично, с учетом (3), для ОНП с Δ -слоем находим:

$$P(r_0) = \frac{q_0^2}{32\pi^2 \varepsilon_0 r_0^2} \left[\frac{\Delta(2r_0 + \Delta)}{\varepsilon_1 (r_0 + \Delta)^2 r_0^2} + \frac{L(2r_0 + 2\Delta + L)}{\varepsilon_2 (r_0 + \Delta)^2 (r_0 + \Delta + L)^2} \right], \quad (5)$$

которая уточняет (1) с учетом длины Дебая L и Δ -слоя. Как и следовало ожидать, формулы (4) и (5) при $\Delta = 0$, $L \rightarrow \infty$ приходят к виду (1). Отметим, что длина Дебая $L = 9.6$ нм в чистой и $L = 0.96$ нм в соленой воде.

На Рис. 2 приведены зависимости давления $P_i(r_0)$ от радиуса ОНП по формулам (4) и (5) в чистой ($c = 1$ моль/м³) и соленой ($c = 100$ моль/м³) воде, а также давление Лапласа $P_L(r_0)$, где индекс давления $P_i(r_0)$ соответствует номеру кривой на графике Рис. 2. Видно увеличение кулоновского давления за счет Δ -слоя ОНП, что повышает его стабильность и особенно сильно проявляется в соленой воде. Отметим, что при $P_i(r_0) > P_L(r_0)$ именно заряд делает ОНП стабильным, особенно в области его меньших размеров. Это указывает на ошибочность вывода [41] о недостижимости стабильности ОНП за счет выполнения условия $P(r_0) = P_L(r_0)$.

Рис. 2. Графики зависимости давлений $P_i(r_0)$ на границе нанопузыря ($q_0 = 4 \cdot 10^{-16}$ Кл) от его радиуса: кривые 1, 2 – давления $P_1(r_0)$ и $P_2(r_0)$ для ОНП без Δ -слоя в соленой ($c = 100$ моль/м³) и чистой ($c = 1$ моль/м³) воде, соответственно; кривые 3, 4 – давления $P_3(r_0)$ и $P_4(r_0)$, для ОНП с Δ -слоем в соленой ($c = 100$ моль/м³) и чистой ($c = 1$ моль/м³) воде, соответственно; кривая 5 – давление Лапласа $P_5(r_0) = P_L(r_0)$ по формуле (2).

Сравним эффективность влияния Δ -слоя в соленой и чистой воде, определив отношение давлений $k_0(r_0) = P_4(r_0)/P_2(r_0)$ в чистой и $k_c(r_0) = P_3(r_0)/P_1(r_0)$ в соленой воде для ОНП с Δ -слоем и без него, что показано на рис.3.

Рис. 3. График зависимости отношения $P(r_0)/P_c(r_0)$ от радиуса ОНП с Δ -слоем и без него: кривая 1 – отношение давлений $k_0(r_0) = P_4(r_0)/P_2(r_0)$ в чистой воде ($c = 1$ моль/м³); кривая 2 – отношение давлений $k_c(r_0) = P_3(r_0)/P_1(r_0)$ в соленой воде ($c = 100$ моль/м³).

Проведем анализ полученных результатов. Повышение давления $P(r_0)$ у ОНП с Δ -слоем связано с тем, что емкость $C(r_0)$ последовательно соединенных конденсаторов C_1 и C_2 определяется наименьшей из этих величин – емкостью C_1 Δ -слоя ОНП, с учетом $\epsilon_1 \ll \epsilon_2$. Это, в соответствии с (5), увеличивает $P(r_0)$. Также на Рис. 2 видно, что с повышением радиуса ОНП его давление $P(r_0)$ становится ниже давления Лапласа $P_L(r_0)$, поскольку $P_L(r_0)/P(r_0) \sim r_0^3$, с учетом (1), (2). Кроме того, размеры стабильного ОНП за счет Δ -слоя увеличиваются с увеличением его радиуса, но уменьшаются с повышением солёности раствора. Это можно объяснить уменьшением длины Дебая L и емкости ОНП, с учетом (5). Также видно, что Δ -слой ослабляет влияние солёности на давление и на стабильность ОНП. Это обусловлено тем, что влияние емкости C_2 подавлено первым

слагаемым в квадратных скобках (5), которое сравнительно велико по указанной выше причине $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_2$.

На Рис. 3 видно, что в соленой воде Δ -слой повышает давление ОНП почти в 30 раз, а в пресной – от 10 до 4-х раз в диапазоне размеров ОНП 5–100 нм. Это также поясняется конкуренцией отмеченных выше слагаемых формулы (5). Причем в соленой воде слагаемое, зависящее от L , настолько мало, что его изменение почти не влияет на величину $k_c(r_0)$, в отличие от зависимости $k_c(r_0)$ в чистой воде. Также важно отметить, что графики рис.2 зависят от величины заряда ОНП q_0 , а графики Рис. 3 не зависят, т.к. q_0 входит сомножителем в выражения (4) и (5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

- Стабильность ОНП обеспечивает Δ -слой с ОДП $\varepsilon_1 = 3$;
- Кратность повышения давления ОНП за счет Δ -слоя не зависит от его заряда;
- Давление ОНП за счет солености заметно падает для ОНП без Δ -слоя и незначительно – для ОНП с Δ -слоем.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (госзадание № 121112200122-7).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tan B.H., An H., Ohl C.-D.* How bulk nanobubbles might survive // *Physical Review Letters*. 2020. V. 124. P. 134503.

[10.1103/PhysRevLett.124.134503](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.134503)

2. *Бункин Н.Ф., Шкирин А.Ф.* Исследование бабстонно-кластерной структуры воды и водных растворов электролитов методами лазерной диагностики // *Труды ИОФАН им. А.М. Прохорова*. 2013. Т.69. С. 3–57.

3. *Favvas E.P., Kyzas G Z., Efthimiadou E.K., Mitropoulos A.Ch.* Bulk nanobubbles, generation methods and potential applications// *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2020. Vol. 54. P. 101455.

<https://doi.org/10.1016/j.cocis.2021.101455>

4. *Nazary S., Hassanzadeh A., He Y., Khoshdast H., Kowalczyk P.B.* Recent developments in generation, detection and application of nanobubbles in flotation // *Minerals*. 2022. V. 12. №4. P. 462.

<https://doi.org/10.3390/min12040462>

5. *Wang H., Varghese J., Pilon L.* Simulation of electric double layer capacitors with mesoporous electrodes: Effects of morphology and electrolyte permittivity // *Electrochim. Acta*. 2011. V. 56. №17. P. 6189–6197.

<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.03.140>

6. *Singh S. B., Shukla N.,• Cho C. H., Kim B.S., Park M.H., Kim K.* Effect and application of micro- and nanobubbles in water purification // *Toxicology and Environmental Health Sciences*. 2021. V. 13. P. 9–16.

<https://doi.org/10.1007/s13530-021-00081-x>

7. *Meegoda J.N, Hewage S.A., and Batagoda J.H.* Stability of nanobubbles // *Environmental Engineering Science*. 2018. V. 35. №11. P. 1216–1227.

<http://doi.org/10.1089/ees.2018.0203>

8. *Meegoda J.N., Hewage S.A., and Batagoda J.H.* Application of the diffused double layer theory to nanobubbles // *Langmuir* 2019. V. 35. №37. P. 12100–12112.

<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b01443>

9. *Kelsall G.H., Tang S., Yurdakult S., Smith A.L.* Electrophoretic behaviour of bubbles in aqueous electrolytes // *J. Chem. SOC., Faraday Trans.* 1996. V. 92. №20. P. 3887–3893.

<https://doi.org/10.1039/FT9969203887>

10. *Chan D.Y.C., Mitchell D.J.* The free energy of an electrical double layer // *Journal of Colloid and Interface Science.* 1983. V. 95. №. 1. P. 193–197.

11. *Бункин Н. Ф., Бункин Ф. В.* Бабстонная структура воды и водных растворов электролитов // *Успехи физических наук.* 2016. Т. 186. № 9. С. 933–952.

<https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.05.037796>

12. *Hewage S.A., Kewalramani J. and Meegoda J.N.* Stability of nanobubbles in different salts solutions // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2021. V. 609. P. 125669.

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125669>

13. *Lopez-Garsia J.J., Moya A.A., Horno J., Delgado A., and Lez-Caballero F.G.* A network model of the electrical double layer around a colloid particle // *Journal of colloid and interface science.* 1996. V. 183. №1. P.124–130.

<https://doi.org/10.1006/jcis.1996.0525>

14. *Jadhav A.J., Barigou M.* On the clustering of bulk nanobubbles and their colloidal stability // *Journal of Colloid and Interface Science.* 2021. V. 601. P. 816–824.

<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.05.154>

15. *Ma X., Li M., Pfeiffer P.* Ion adsorption stabilizes bulk nanobubbles // *J. Colloid Interfac. Sci.* 2022. V. 606. P. 1380–1394.

<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.08.101>

16. *Nirmalkar N., Pacek A.W., Barigou M.* On the existence and stability of bulk nanobubbles // *Langmuir*. 2018. V. 34. № 37. P. 10964–10973.

<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b01163>

17. *Zhang H., Guo Z., Zhang X.* Surface enrichment of ions leads to the stability of bulk nanobubbles // *Soft Matter*. 2020. V. 16. P. 5470–5477.

<https://doi.org/10.1039/d0sm00116c>

18. *Temesgen T., Bui T.T., Han M., Kim T., Park H.* Micro and nanobubble technologies as a new horizon for watertreatment techniques: A review // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2017. V. 246. P. 40–51.

<https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.06.011>

19. *Kyzas G.Z., Mitropoulos A.C.* From bubbles to nanobubbles // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. №10. P. 2592.

<https://doi.org/10.3390/nano11102592>

20. *Левин Ю.К.* Механизм стабильности нанопузырей в воде // *Изв. вузов. Физика*. 2024. Т. 67. №10. С. 58–61.

<https://doi.org/10.17223/00213411/67/10/7>

21. *Weissenborn P.K., Pugh R.J.* Surface tension of aqueous solutions of electrolytes: Relationship with ion hydration. Oxygen solubility, and bubble coalescence// *J. Colloid Interface Science*. 1996. V. 184. №2. P. 550–563.

<https://doi.org/10.1006/jcis.1996.0651>

22. *Craig V.S.J., Ninham B.W., and Pashley R.M.* The effect of electrolytes on bubble coalescence in water // *J. Phys. Chem*. 1993. V. 97. №39. P. 10192–10197.

<https://doi.org/10.1021/j100141a047>

23. *Tsao H.K., Koch D. L.* Collisions of slightly deformable, high Reynolds number bubbles with shortrange repulsive forces // *Physics of Fluids*. 1994. V. 6. №8. P. 2591–2605.

<https://doi.org/10.1063/1.868149>

24. *Koshoridze S.I. and Levin Yu.K.* Thermodynamic analysis of the stability of nanobubbles in water // *Nanoscience and Technology: An International Journal*. 2019. V. 10. №1. P.21–27.

<https://doi.org/10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2018028801>

25. *Calgaroto S., Willberg K. Q. and Rubio J.* On the nanobubbles interfacial properties and future applications in flotation // *Minerals Engineering*. 2014. V. 60. P. 33–40.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.02.002>

26. *Koshoridze S.I. and Levin Yu.K.* Comment on “Can bulk nanobubbles be stabilized by electrostatic interaction?” by S. Wang, L. Zhou and Y. Gao, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2021. 23. 16501 // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2022. V. 24. P. 10622–10625.

<https://doi.org/10.1039/D1CP04406K>

27. *Joly L., Ybert C., Trizac E., Bocquet L.* Hydrodynamics within the electric double layer on slipping surfaces // *Phys. Rev. Lett.* 2004. V. 93. P. 257805.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.257805>

28. *Бошнятов Б.В., Кошоридзе С.И., Левин Ю.К.* Об устойчивости нанопузырей в воде // *Изв. вузов. Физика*. 2018. Т. 61. № 10. С. 149–155.

29. *Кошоридзе С.И., Левин Ю.К.* Условия зарождения и стабильности объемных нанопузырьков // *Изв. вузов. Физика*. 2022. № 1. С. 89–95.

<https://doi.org/10.17223/00213411/65/1/89c>

30. *Кошоридзе С.И., Левин Ю.К.* Стабильность заряженных нанопузырьков в воде. *Письма в ЖТФ*. 2019. Т. 45. С.61–62.

<https://doi.org/10.21883/PJTF.2019.01.47161.17521>

31. Левин Ю.К. Условия стабильности слоя Штерна объемных нанопузырей в воде // Изв. вузов. Физика 2022. Т. 65. № 12. С. 55–59.

<https://doi.org/10.17223/00213411/65/12/55>

32. Fumagalli L., Esfandiar A., Fabregas R., Hu S., Ares P., Janardanan A., Yang Q., Radha B., Taniguchi T., Watanabe K., Gomila G., Novoselov K.S., Geim A.K. Anomalously low dielectric constant of confined water // Science. 2018. V. 360. C. 1339–1342.

<https://doi.org/10.1126/science.aat4191>

33. Toney M.F., Howard J.N., Richer J., Gary L., Gordon J.G., Melroy O.R., Wiesler D.G.; Yee D., Sorensen. L.B. Voltage-dependent ordering of water molecules at an electrode-electrolyte interface // Nature. 1994. V. 368. P. 444–446.

<https://doi.org/10.1038/368444a0>

34. Lee C.Y., McCammon J.A., Rossky P.J. The structure of liquid water at an extended hydrophobic surface // J. Chem. Phys. 1984. V. 80. №9. P. 4448–4455.

<https://doi.org/10.1063/1.447226>

35. Velasco-Velez J.-J., Wu C.H., Pascal T.A., Wan L.F., Guo J.A., Prendergast D., Salmeron M. The structure of interfacial water on gold electrodes studied by x-ray absorption spectroscopy // Science. 2014. V. 346. P. 831–834.

<https://doi.org/10.1126/science.1259437>

36. Hewage S.A., Kewalramani J. and Meegoda J.N. Stability of nanobubbles in different salts solutions // Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2021. V. 609. P. 125669.

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125669>

37. Левин Ю.К. Характеристики двойного электрического слоя объемных нанопузырей в воде // Коллоид. журн. 2023. Т. 85. № 3. С. 350–354.

<https://doi.org/10.31857/S0023291223600220>

38. Кошоридзе С.И. Влияние строения двойного электрического слоя на стабильность объемных нанопузырей // Инженерная физика. 2023. № 7. С.22–25.

<https://doi.org/10.25791/infizik.7.2023.1342>

39. Меледин Г.В., Черкасский В.С. Электродинамика в задачах. Ч.1 // НГУ. 2009.

40. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 5. М.: Мир, 1966.

41. Левин Ю.К. Новая концепция стабильности нанопузырей в воде. // Сб. трудов 13-й Всерос. конф. «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред». 2023. (С. 208, гл. 1). М.: ИПРИМ РАН.

<https://doi.org/10.33113/conf.mkmk.ras.2023.28>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. Структура оболочки объемного нанопузыря.

Рис.2. Графики зависимости давлений $P_i(r_0)$ на границе нанопузыря ($q_0=4 \cdot 10^{-16}$ С) от его радиуса: кривые 1, 2 - давления $P_1(r_0)$ и $P_2(r_0)$ для ОНП без Δ -слоя в соленой ($c=100 \text{ mol/m}^3$) и чистой ($c=1 \text{ mol/m}^3$), воде, соответственно; кривые 3, 4 – давления $P_3(r_0)$ и $P_4(r_0)$, для ОНП с Δ -слоем в соленой ($c=100 \text{ mol/m}^3$) и чистой ($c=1 \text{ mol/m}^3$) воде, соответственно; кривая 5 - давление Лапласа $P_5(r_0) = P_L(r_0)$ по формуле (2).

Рис.3. График зависимости отношения $P(r_0)/P_c(r_0)$ от радиуса ОНП с Δ -слоем и без него: кривая 1 - отношение давлений $k_0(r_0) = P_4(r_0)/P_2(r_0)$ в чистой воде (1 mol/m^3); кривая 2 - отношение давлений $k_c(r_0) = P_3(r_0)/P_1(r_0)$ в соленой воде ($c = 100 \text{ mol/m}^3$).

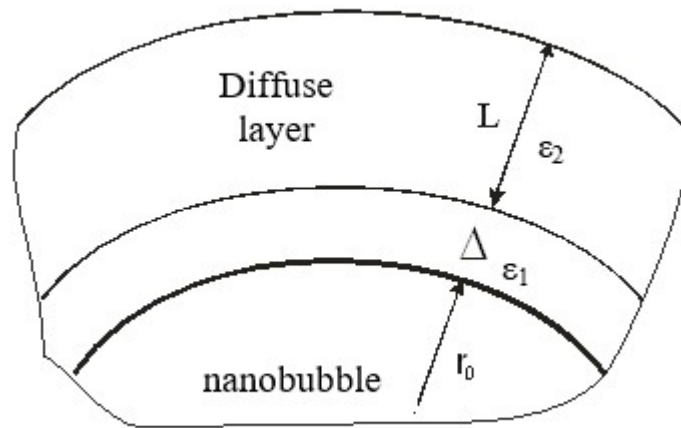


Рисунок 1. Левин

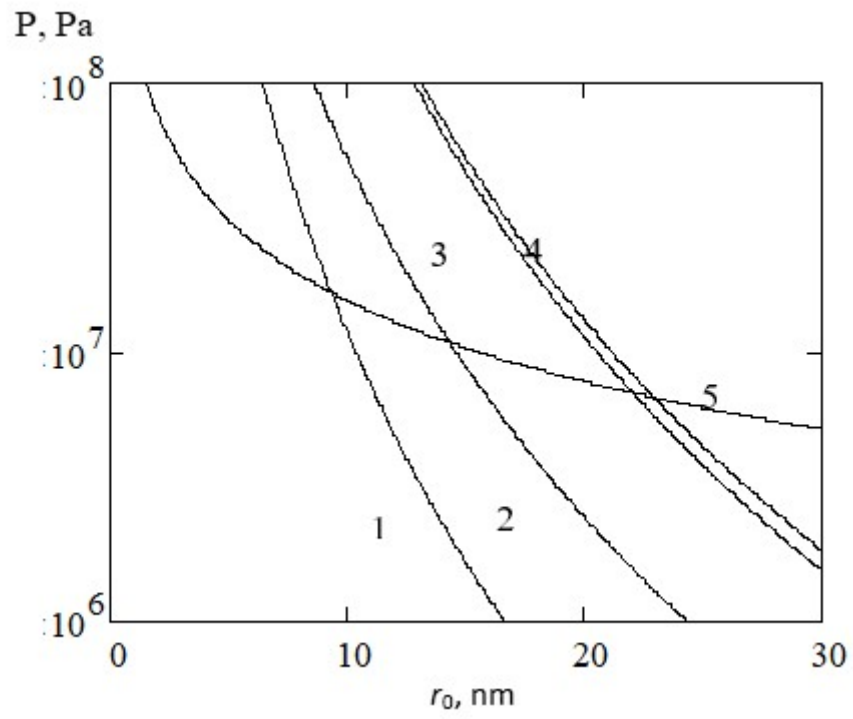


Рисунок 2. Левин

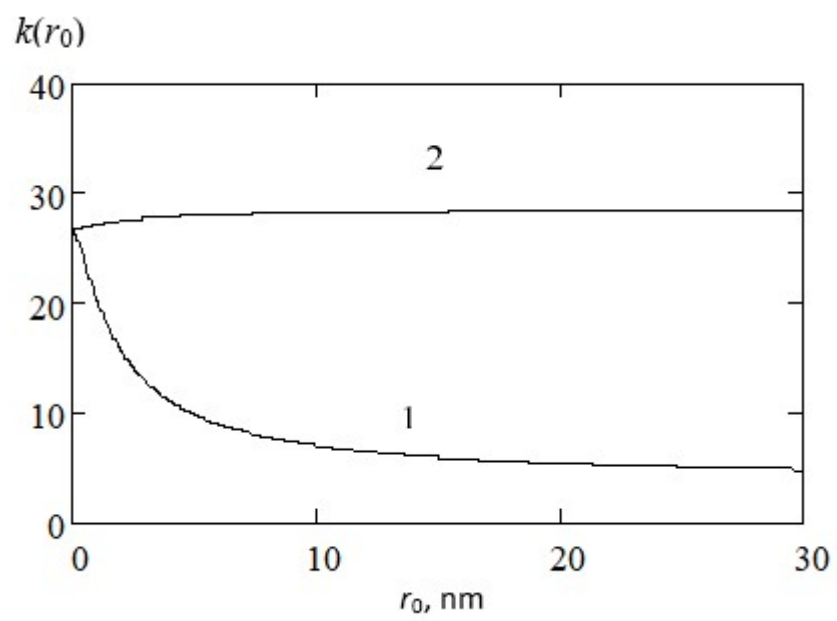


Рисунок 3. Левин