

Методика расчета давления нанопузыря в воде

Ю.К. Левин¹¹ Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Рассмотрена методика расчета кулоновского давления P_C на границе заряженного нанопузыря в воде без солей. Учтено, что вода в электростатическом поле нанопузыря поляризуется и вокруг его заряда q_0 в воде наводится связанный заряд q_1 . Показано, что давление P_C имеет два слагаемых: за первое отвечает давление P_q суммы зарядов q_0 и q_1 в вакууме, а за второе – давление поляризованной воды P_p . Оба слагаемых положительны и увеличивают радиус нанопузыря. Причем последнее давление в $(\epsilon-1)$ раз больше первого. Также показана ошибочность некоторых мнений: давление P_C отрицательно, давление Лапласа P_L положительно, вода сжимает нанопузырь, либо вообще не давит на него.

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

Нанопузырям в воде посвящен ряд публикаций, в том числе [1–18]. Различают поверхностные нанопузыри (ПНП), неподвижно закрепленные на границе раздела твердой и жидкой сред, и объемные (ОНП) – подвижные. 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, производить дезинфекцию воды и окисление органических загрязняющих веществ. Также с помощью ОНП решаются проблемы экологии, медицины/биомедицины, сельского хозяйства, оптимизации терапевтических и диагностических методов и других областей благодаря малому размеру, большой удельной площади поверхности, длительному времени пребывания в воде, высокой мощности массопереноса, высокому дзета-потенциалу [3] ОНП. Их применение при очистке коммерческих и бытовых сточных вод вместо ранее использовавшихся биологических подходов снижает затраты энергии, повышает эффективность, исключает дорогие химикаты и многоступенчатую обработку [4]. Для практического применения ОНП должны быть стабильными, т.е. иметь большие времена жизни. Различные механизмы обеспечения стабильности обсуждались в литературе [7–10, 16]. 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. Также, но в меньшей степени влияет градиент поверхностного натяжения при слиянии пузырьков (эффект Гиббса – Марангони) [7, 8]. Отмечалось влияние и гидратации ионов [9]. Самое широкое распространение получил электростатический подход [1, 7–16], при котором полагают, что стабильность ОНП обеспечивается равновесием действующих на границе ОНП кулоновского $P_C(r_0)$ [19] и лапласовского $P_L(r_0)$ [20] давлений:

$$P_C(r_0) = -\frac{\partial W_C(r_0)}{\partial r_0} \frac{1}{4\pi r_0^2} = \frac{q_0^2}{32\pi^2 \epsilon_0 \epsilon r_0^4}, \quad (1)$$

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

где r_0 и q_0 – радиус и заряд ОНП; $\epsilon = 80$ – относительная диэлектрическая проницаемость (ОДП) воды; $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума; $\alpha = 0.072$ Н/м – коэффициент поверхностного натяжения воды; $W_C(r_0)$ – кулоновская энергия ОНП.

Давление газа внутри ОНП не учитывается, так как оно на порядки меньше давлений P_C и P_L во всем диапазоне размеров ОНП. Общепризнано, что давления P_C и P_L противоположно направлены и имеют разные знаки. Однако до сих пор нет единого мнения о знаке этих давлений. Согласно [17, 18], $P_L(r_0) > 0$ и, следовательно, $P_C(r_0) < 0$, но обратное доказано в [15, 19–22], что делает обсуждение этого вопроса актуальным.