

## Энергия нанопузырей с гидратной оболочкой

Ю.К. Левин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

Показано, что энергия заряженного объемного нанопузыря (ОНП) образована парциальными энергиями свободного и связанных зарядов в вакууме, а также энергиями поляризации диэлектрика в гидратном слое и за его пределами. Гидратный слой увеличивает энергию ОНП в 5.3 раза при радиусе 5 нм и не более 8% при радиусе более 25 нм на величину, близкую к энергии этого слоя. Энергия поляризации диэлектрической среды почти на 2 порядка превосходит энергию зарядов в вакууме в гидратном и диффузном слоях. При радиусе менее 26 нм полная электростатическая энергия ОНП внутри гидратной оболочки больше, чем за ее пределами. У более крупных нанопузырей больше энергии сосредоточено за пределами гидратной оболочки.

**Ключевые слова:** диэлектрическая жидкая среда, кулоновское и лапласовское давление, связанный наведенный поляризационный заряд, размер и заряд нанопузырей.

Интерес к объемным нанопузырям (ОНП) в воде связан с перспективами их применения в различных областях [1, 2]. 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. Также с помощью ОНП решаются проблемы экологии, сельского хозяйства, в медицине/биомедицине, 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 [4]. Поэтому исследование свойств ОНП, в том числе их стабильности, актуально, чем объясняется активное обсуждение этого вопроса в литературе [5–7].

Очевидно, в основе любого технологического прорыва лежат фундаментальные знания. Это относится и к ОНП, в частности, к его электростатической энергии: какова ее природа, ее составляющие и соотношение между ними. Из работ [8, 9] было известно, что вблизи границы раздела вода упорядочена слоями толщиной несколько молекулярных диаметров от этой границы, где молекулы стремятся сохранить максимальное количество водородных связей и «силы упаковки» создают плотный слой в контакте с поверхностью. Направления дипольных моментов  $\mathbf{p}$  выравниваются в приповерхностном слое в касательном направлении, так как ориентацию вектора поляризации диполя определяет водородная связь, а не электрическое поле. Четкая слоистая структура воды формируется в пределах  $\Delta \approx 1$  нм от поверхности электрода независимо от его гидрофильности. Это подтвердили как расчеты методом молекулярной динамики [10], так и сканирующая диэлектрическая микроскопия локальной емкости воды между атомарно плоскими стенками, которая также обнаружила межфазный  $\Delta$ -слой толщиной 1 нм с относительной диэлектрической проницаемостью (ОДП)  $\epsilon_1 \approx 3$  [11]. Принцип экономии энергии применим и к ОНП с закрепленным на его оболочке зарядом  $q_0$ . Это легло в основу гипотезы, предложенной в [12], где показано, что  $\Delta$ -слой минимизирует энергию ОНП, так как водородные связи высвобождают больше энергии, чем поляризация диполей в электрическом поле. В итоге получен вывод, что ОНП в воде окружен гидратным  $\Delta$ -слоем (далее – слой А,  $r_0 < r < r_0 + \Delta$ ,  $\epsilon_A = 3$ ), вне которого расположен диффузный слой (слой В,  $r > r_0 + \Delta$ ,  $\epsilon_B = 80$ ). Поскольку в электрическом поле заряда ОНП  $q_0$  окружающая диэлектрическая среда поляризуется, то формируются две двухслойные оболочки: первая образована свободным зарядом  $q_0$  и примыкающим к нему связанным зарядом  $q_1$  у внутренней границы области А). Вторая образована связанными зарядами  $q_2$  у внешней границы области А и  $q_3$  у внутренней границы области В (рис. 1).