

## УСЛОВИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ И СТАБИЛЬНОСТИ ОБЪЕМНЫХ НАНОПУЗЫРЬКОВ

С.И. Кошоридзе, Ю.К. Левин

*Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

Проведен термодинамический анализ зарождения объемных нанопузырьков (ОНП) в пересыщенном водном растворе. В модели заряженного ОНП с двойным электрическим слоем вычислены минимальная работа образования и радиус критических зародышей. Выведены простые аналитические выражения, при выполнении которых ОНП не будет растворяться в воде, т.е. будет стабилен. Авторам впервые удалось объяснить загадку больших времен жизни ОНП.

**Ключевые слова:** *объемный нанопузырь, закон Генри, энергия образования зародыша.*

В мире растет число экспериментальных и теоретических исследований объемных нанопузырьков (ОНП), что связано с их широким применением в различных областях науки и техники, однако причины их стабильности до сих пор были не ясны [1].

Рассмотрим вкратце две последние публикации на данную тему. В работе [2] авторы хорошо известную для поверхностных нанопузырьков теорию динамического равновесия [3] применили для ОНП. Согласно [3], гидрофобная подложка притягивает растворенный в воде газ, поэтому на границе соприкосновения трех фаз, т.е. по периметру поверхностного нанопузырька, создается обогащенный газом тонкий слой, откуда газ всасывается внутри нанопузырька. Из остальной части границы пузырь – вода газ диффундирует в воду из-за большого лапласовского давления. В состоянии динамического равновесия общие потоки, направленные внутри и из ОНП, равны. Перенеся эту теорию на случай сферического пузыря [2], получается, что часть поверхности нанопузыря должна быть покрыта гидрофобным материалом. В результате вычислений авторы вводят некий характерный радиус, при котором ОНП стабилен. Само собой требование, чтобы ОНП был покрыт гидрофобным материалом – довольно искусственное предположение. Вызывает вопросы и расчетная (теоретическая) часть работы [2]. В частности, авторы необоснованно считают, что химический потенциал газа внутри ОНП имеет вид потенциальной ямы.

В теоретической работе [4] на основе проведенного термодинамического анализа авторы делают вывод, что у ОНП есть так называемый максимальный диаметр: при диаметре меньше максимального, пузырь находится в метастабильном состоянии и в течении долгого времени не растворяется. Данная работа содержит ряд неверных утверждений. К примеру, авторы считают, что тепловая энергия газа внутри ОНП в процессе изменения его размеров не меняется  $\frac{dU_{\text{gas}}}{dr} = 0$ .

Однако это справедливо, если число молекул внутри постоянно. Ясно, что из-за диффузии из пузырька в воду это утверждение неверно. Есть и другие неправильные, на наш взгляд, формулы и утверждения, что дает право нам утверждать, что работа [4] ошибочна.

Давно было высказано предположение, что двойной электрический слой (ДЭС) на границе ОНП играет стабилизирующую роль (см. обзор [5]). В частности, заряд на поверхности нанопузырька создает растягивающее кулоновское давление, частично или полностью компенсирующее избыточное лапласовское давление и способствующее уменьшению диффузионного растворения ОНП [6–8].

В настоящей работе проводится теоретическое исследование зарождения и стабильности ОНП. Вычисляются критический радиус  $R_{\text{cr}}$  и минимальная энергия образования ОНП  $W_{\text{min}}$  с учетом ДЭС и кулоновской энергии растяжения «стенок» заряженного пузыря. Выводится условие в виде простой аналитической формулы, при выполнении которого образовавшийся ОНП не будет растворяться.

Пусть в жидкости (воде), находящейся под давлением  $p_{\text{max}}$ , концентрация  $c$  растворенных молекул газа по закону Генри соответствует выражению

$$p_{\text{max}} = k_{\text{H}} c. \quad (1)$$

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>