

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСОВ ДАВЛЕНИЯ НА ДИНАМИКУ ВОДО-ГАЗОСОЛЕВЫХ ЗАРОДЫШЕЙ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ

В.Б. Юферов, А.Н. Пономарев, А.Н. Озеров, И.В. Буравиллов, Д.В. Винников
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина

E-mail: v.yuferov@kipt.kharkov.ua

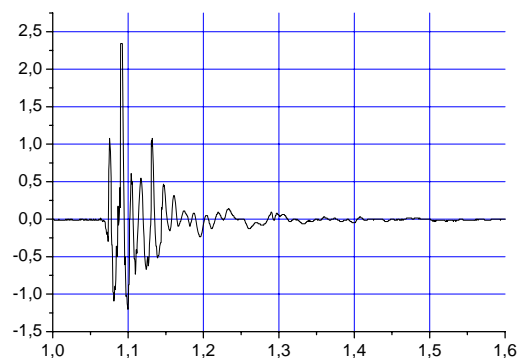
Используя метод релеевского рассеяния света исследовались процессы динамики роста и распада водо-газосолевых зародышей в растворе под действием акустических импульсов. Предложена модель зародыша.

ВВЕДЕНИЕ

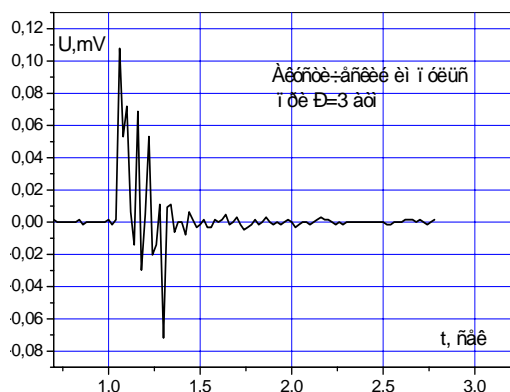
Ранее в [1-3] были описаны эксперименты по дегазации воды с помощью акустических импульсов. Высказана гипотеза об образовании смешанных газосолевых зародышей, которые растут и всплывают, когда архимедова сила положительна, или существуют в воде, не всплывая, и удерживают на себе газ, если сила – отрицательна. Сейчас эти эксперименты продолжены с дистиллированной, водопроводной водой и 3 % раствором NaCl. Установка включала: вакуумируемую до ~80 мм рт. ст. камеру, заполненную 20 л воды с температурой 20 °С, импульсный газодинамический излучатель (рабочий газ – воздух), пьезоакустический датчик и систему контроля изменения оптических свойств жидкости, состоящую из 2-милливаттных лазеров с $\lambda = 470$ и 602 нм, фотодиодов с системой регистрации. Вакуумирование проводилось для увеличения мощности излучателя, получения состояния пересыщения по растворенным газам и увеличения удельной подъемной силы Архимеда (атомов соли на молекулу воздуха).

Вид акустического сигнала в жидкости и на корпусе камеры, возникающего при инъекции газа из пневмоизлучателя в воду, связанного с быстрым образованием и последующим всплытием газовой полости, представлен на рис. 1.

На рис. 2 приведены кривые зависимости прозрачности во времени для дистиллированной и водопроводной воды с количеством примесей около 0,5 г/л и солевого раствора с концентрацией примесей около 30 г/л. Приведены кривые прозрачности для первого и десятого импульсов.



а



б

Рис. 1. Вид акустического сигнала пневмоизлучателя (а – в жидкости; б – на корпусе вакуумной камеры)

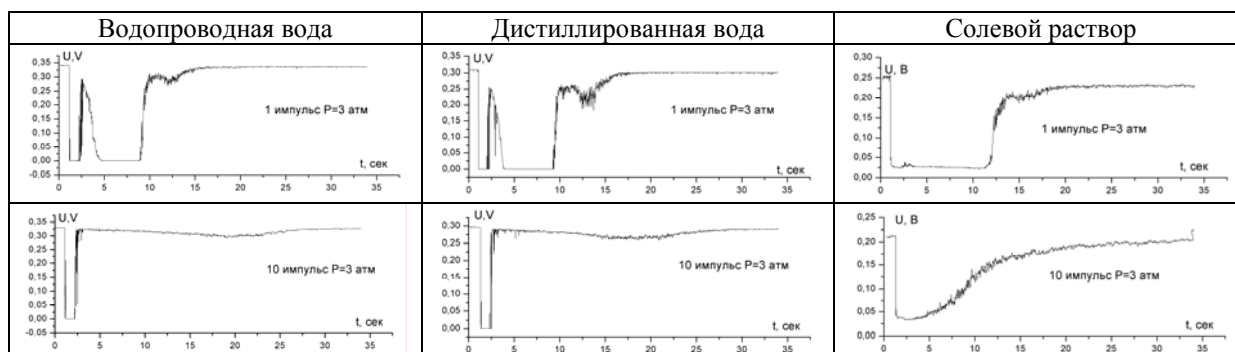


Рис. 2. Кривые зависимости прозрачности для дистиллированной и водопроводной воды с количеством примесей около 0,5 г/л и 3% солевого раствора (30 г/л) от времени для излучателя с длиной волны $\lambda = 470$ нм

На рис. 3 приведены кривые прозрачности при импульсном акустическом воздействии на солевой

раствор для 1, 5, 10, 20, 40 и 50 импульса, для пучка с $\lambda = 470$ нм.

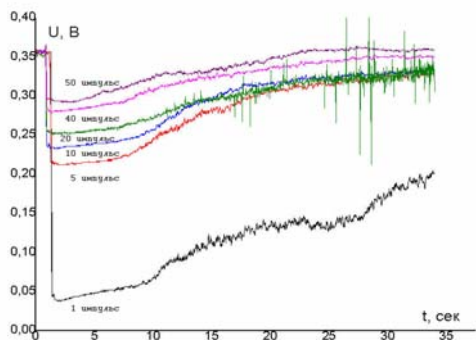
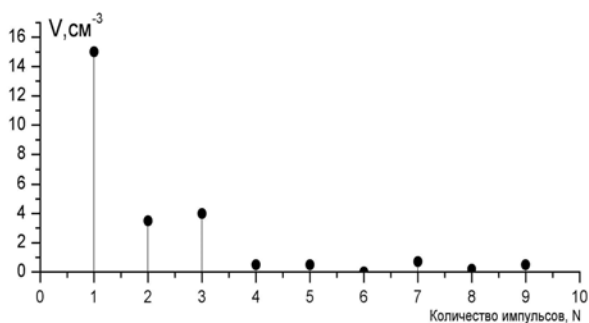
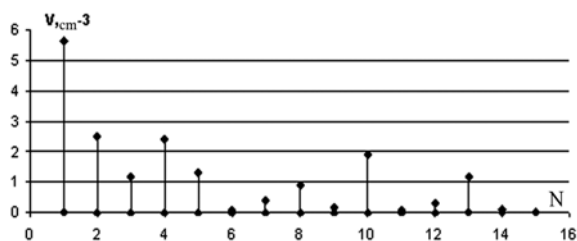


Рис. 3. Зависимость прозрачности солевого раствора (30 г/л) от времени для различного количества импульсов (длина волны $\lambda = 470$ нм)

Величины газовыделения дистиллированной воды и солевого раствора в зависимости от номера импульса показаны на рис. 4.



а



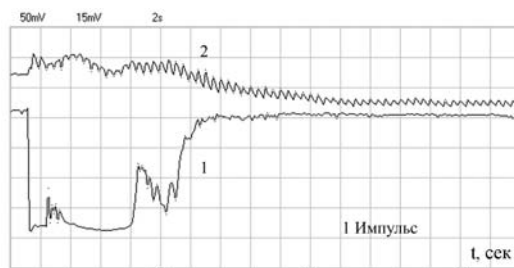
б

Рис. 4. Газовыделение дистиллированной воды и солевого раствора (30 г/л)

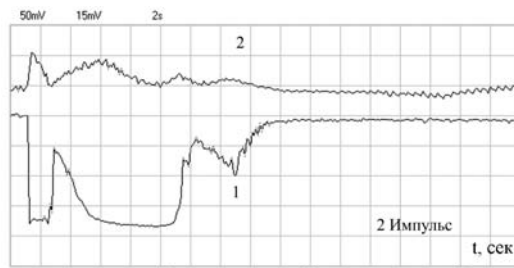
На рис. 5 представлены кривые прозрачности прошедшего (кривая 1) и отраженного сигналов (кривая 2) в водопроводной воде для $\lambda = 470$ нм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

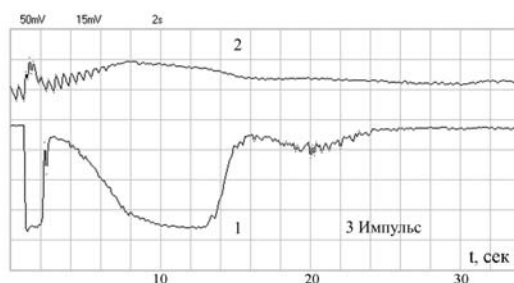
При исследовании процесса дегазации чистых жидкостей и растворов было обнаружено различие в характере протекания процессов. В чистых жидкостях и при малом количестве примесей рост газовых пузырьков, активированный акустическим импульсом, монотонный: от размеров в несколько десятков ангстрем с количеством молекул в пузырьке $20 \dots 100$ до размеров $d \leq \lambda/15$ ($300 \dots 400$ А) и количеством молекул $\sim 10^6$ и далее до размеров $\sim 0,1$ см с числом молекул газа $10^{15} \dots 10^{16}$, выходящих на границу жидкость-газ. В растворах, уходящих на границу, пузырьков было уже меньше, зато большая часть их совсем не всплывала, а просуществовав в растворе несколько секунд, растворялась (см. рис. 2. и 5).



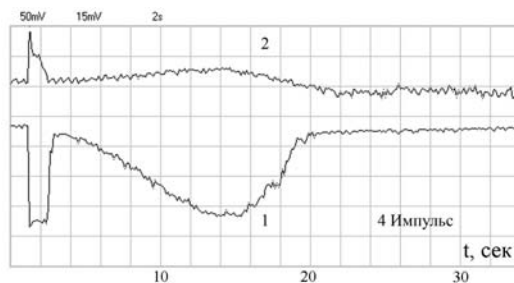
а



б



б



г

Рис. 5. Кривые зависимости прозрачности прошедшего (кривая 1) и отраженного сигналов (кривая 2) в водопроводной воде, для излучателя с длиной волны $\lambda = 470$ нм

Для исследования динамики этих зародышей была использована методика ослабления интенсивности пучка света, проходящего через «мутные среды». Как известно, ослабление интенсивности луча света, проходящего через среду, определяется процессами экстинкции – поглощения и рассеяния света, что описывается выражением: $I = I_0 \exp(-kL)$. Здесь I_0 – интенсивность падающего света; I – интенсивность прошедшего света; k – коэффициент затухания волны, который может быть представлен как $k = k_{нел} + k_{рас} + k_{отр}$, где $k_{нел}$ – коэффициент поглощения проходящей через среду волны, $k_{рас}$ – коэффициент рассеяния, $k_{отр}$ – коэффициент отражения; L – толщина поглощающего слоя. Мы разделили вы-

ражение процесса рассеяния на два слагаемых: $k_{рас} + k_{отр}$, поскольку релеевское рассеяние связано с частицами, имеющими размер $d \leq \lambda/15$, а рассеяние Ми с частицами $d > \lambda/15$. Это позволяет одновременно следить за двумя фракциями с различным размером частиц и более широким их распределением по размерам:

$k = n_1 \sigma_{погл} + n_2 \sigma_{рас} + n_3 \sigma_{отр}$, где n_i – концентрация i -компоненты, а $\sigma_{погл}$, $\sigma_{отр}$, $\sigma_{рас}$ – сечения поглощения, отражения и рассеяния.

Из рис. 5 можно сделать вывод, что частиц в растворе в начальный момент с размерами, близкими к максимальным, достаточно много, и их рост до фиксируемых размеров происходит достаточно быстро. Рис. 4 подтверждает, что в растворах растворенные соли связывают растворенный газ и, очевидно, снижают его подвижность, создавая потенциальные ловушки на его пути.

Акустический импульс, генерируемый в жидкости, имеет длительность около 30 мс, в то время как длительность акустического импульса, генерируемая и фиксируемая на корпусе камеры, составляет около 0,5 с (см. рис. 1). Таким образом, первоначальный короткий импульс в жидкости (см. рис. 1,а) вызывает рост пузырьков, что заставляет спустя достаточно продолжительное время после прохождения импульса предположить либо наличие длительно затухающих акустических колебаний (см. рис. 1,б) (эффект колокола – собственные колебания системы и паразитные колебания системы, определяемые работой форвакуумного насоса), уже не фиксируемых датчиками, либо действие дополнительных факторов, подобных наблюдаемым в работах [4–6].

На основании приведенных данных, временные зависимости скорости роста и распада зародышей с числом частиц $N = 10^6$ и 10^9 в жидкости при импульсном акустическом воздействии представим на рис. 6.

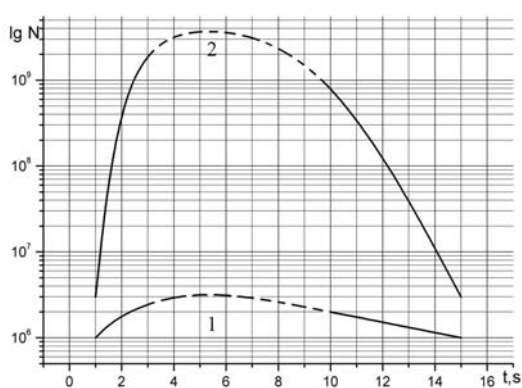


Рис. 6. Зависимость скорости роста и распада зародышей в жидкости с $N = 10^6$ (кривая 1) и 10^9 (кривая 2). Пунктиром сделана экстраполяция. N – число частиц в зародыше

Как известно, в воде при 20 °С растворяется около 18 мл/л азота и 35 мл/л кислорода и, если предположить, что имеется только растворенный воздух и отсутствуют пузырьки, получается одна молекула азота (или кислорода) на $N = (7,5 \dots 3,8) \cdot 10^4$ молекул воды. Отсюда расстояние между молекулами газа L ,

определяемое как $L = (N)^{1/3} \delta$, (где $\delta = \delta_1 \approx \delta_2$, δ_1 – диаметр молекулы воды, δ_2 – диаметр молекулы газа), составляет $(34 \dots 42) \delta$. При объединении 8 частиц в зародыши газовой фазы расстояние между зародышами возрастет вдвое. В водопроводной воде при концентрации солей менее 0,5 г/л число частиц оказывается почти на 2 порядка больше концентрации молекул растворенных газов. Следовательно, расстояние между ними составляет $\sim (8 \dots 10) \delta$. А с оболочкой из молекул воды – порядка $(2,5 \dots 3,0) \delta$. И, казалось бы, любое взаимодействие между атомами газа экранируется силовым полем молекул воды. Теория Смолуховского, успешно используемая для описания процесса коагуляции (роста размера) частиц в средах, предполагает, что расстояния между частицами (радиус сферы поглощения $R \approx A$) сравнимы с размером частиц. В этом случае действуют электростатические силы притяжения $\sim 1/r^6$, зависящие от расстояния, поэтому для осуществления начала процесса коагуляции в нашем случае необходимы более дальнедействующие силы. Такого рода силами притяжения могут являться силы Бьеркнеса, приводящие к росту газовых пузырьков при их синфазных колебаниях [7]:

$$F = \rho (d\Omega/dt)^2 \cos \varphi / 4\pi L^2, \quad (1)$$

$$d\Omega/dt = 4\pi r^2 v \quad (2)$$

– объемная скорость пульсации пузырька равна произведению его поверхности на ее колебательную скорость. Здесь Ω , L – объем и расстояние между пузырьками соответственно; ρ – плотность жидкости; φ – фаза колебаний; r , v – радиус пузырька и его радиальная колебательная скорость соответственно. Скорость колебаний поверхности сферы, пульсирующей под действием акустического давления p с частотой f , зависит от соотношения между частотой возбуждения f и резонансной частотой пузырька $f_{рез}$, а также его декрементом затухания η , что позволяет записать формулу Бьеркнеса в виде

$$F = r_1 r_2 p^2 / 2 \pi \rho f^2 L^2 [(f_{рез}^2 / f^2 - 1)^2 + \eta^2]^{0.5} [(f_{рез}^2 f^2 - 1)^2 + \eta^2]^{0.5}. \quad (3)$$

На наш взгляд, синфазные колебания пузырьков с размером $\Omega^{1/3} \gg \delta$ имеют более высокую интенсивность, чем тепловые колебания отрезка решетки воды между ними, уровень которых они локально увеличивают (подобно локальному повышению температуры). Поэтому, как и в случае радиационно-стимулированной диффузии в твердых телах, существенно ускоряется диффузия пузырьков, приводящая к их росту, т.е. массопереносу.

Представленная выше формула Бьеркнеса имеет отношение только к сферическим пузырькам воздуха. В солевом же растворе существуют смешанные пузырьки, состоящие из большого количества соли, воды и малого количества газа, поэтому рост этих зародышей в какой-то мере тоже должен определяться зависимостями, аналогичными формуле Бьеркнеса, хотя этот трехкомпонентный зародыш с числом атомов $N \sim 10^6 \dots 10^9$ существенно отличается от чисто газового пузырька. Т.е. для комбиниро-

ванных водо-газосолевых зародышей формулы Бьеркнеса могут быть несколько иными: должны учитывать структуру и форму самого зародыша. Схематический вид водо-газосолевого зародыша и окружающего раствора представлен на рис. 7. Ввиду того, что силы взаимодействия между молекулами воды, воды и соли и компонентов воздуха с молекулами воды и соли – сильно отличаются, молекулы воздуха можно рассматривать аналогично вакансиям в твердом теле.



Рис. 7. Схематический вид структуры водо-газосолевых образований

Под воздействием мощных акустических импульсов в воде эти вакансии быстро перемещаются и, сливаясь, образуют пузырьки, которые устойчивы при значительных размерах. Эти пузырьки могут втягивать в себя и ионы, и атомы соли. При этом ионы соли могут рекомбинировать, но уже внутри воздушного пузырька, образуя длительно существующие водо-газосолевые зародыши. В процессе роста газовых пузырьков и их всплытия одна молекула газа может уносить до пяти молекул соли, таким образом, транспортируя их на внешнюю макроскопическую поверхность раздела «жидкость-газ» (речь идет о вакуумируемой системе). Здесь пузырьки разрушаются, а принесенные примеси с избыточной, по сравнению с раствором, концентрацией находятся вблизи поверхности. В силу большого градиента концентрации и внутри жидкостных потоков эта область повышенной концентрации примесей быстро рассасывается. В работе [2] описывались эксперименты по выведению соли, и мы не будем этому здесь уделять внимание.

ВЫВОДЫ

Установлено влияние солей на процесс дегазации воды при акустическом воздействии.

Установлено длительное существование крупных зародышей в растворах с размерами $d \sim 0,1$ мкм и количеством молекул $N \sim 10^9$.

Предложена модель водо-газосолевых зародышей.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Б. Юферов, Ю.В. Холод, Е.В. Муфель, В.М. Шулаев. Дегазация закаленно - охлаждающих водоподобных сред звуковыми импульсами // *ОТТОМ-2*: Сборник докладов. 2001, ч. 1, с. 126–129.
2. В.Б. Юферов, Ю.В. Холод, А.Н. Рыбалко и др. О возможности вывода солей из растворов под воздействием акустических волн // *ВАНТ. Сер. "Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение"*. 2002, № 6, с. 149–151.
3. В.Б. Юферов, А.Н. Пономарев, Е.В. Муфель и др. О динамике очистки жидкости акустическими импульсами. // *ВАНТ. Сер. «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2007, №4, с. 171–172.
4. Б.Г. Емец. О влиянии электромагнитных волн оптического диапазона на жидкости // *Вісник ХНУ. Радіофізика та електроніка*. 2001, в. 1, №513, с. 74–80.
5. В.Ф. Казанцев. Движение газовых пузырьков в жидкости под действием сил Бьеркнеса, возникающих в акустическом поле // *ДАН СССР*. 1959, т. 129, №1, с. 64–67.
6. Б.Г. Емец. *Ефекти взаємодії низькоінтенсивних електромагнітних хвиль з нанорозмірними газовими включеннями в рідких середовищах*: Автореф. ... докт. физ.-мат. наук. Харків, 2004.
7. А.М. Прохоров, Д.М. Алексеев, А.М. Балдин и др. *Большая Российская энциклопедия*. М., 1994, т. 4, с. 85.

Статья поступила в редакцию 30.08.2011 г.

ВПЛИВ ІМПУЛЬСІВ ТИСКУ НА ДИНАМІКУ ВОДО-ГАЗОСОЛЬОВИХ ЗАРОДКІВ У ВОДНИХ РОЗЧИНАХ

В.Б. Юферов, А.Н. Пономарьов, А.Н. Озеров, І.В. Буравілов, Д.В. Винников

Використовуючи метод релеєвського розсіювання світла досліджувалися процеси динаміки росту і розпаду водо-газосолевих зародків у розчині під дією акустичних імпульсів. Запропоновано модель зародка.

PULSE PRESSURE EFFECT ON THE GAS-WATER-SALT NUCLEI DYNAMICS IN WATER SOLUTIONS

V. B. Yuferov, A.N. Ponomaryov, A.N. Ozerov, I.V. Buravilov, D.V. Vinnikov

The processes of growth and decay of water, gas and salt nuclei in solution under the effect of the acoustic pulses were investigated using the method of Rayleigh light scattering. A model of the nucleus was proposed.