

*В.Б. ЮФЕРОВ*, д-р. техн. наук,  
*А.Н. ПОНОМАРЕВ*,  
*Е.В. МУФЕЛЬ*,  
*А.Н. ОЗЕРОВ*,  
*И.В. БУРАВИЛОВ*,  
*В.Н. ИЩЕНКО*

## **ИМПУЛЬСНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ОЧИСТКИ И ДЕГАЗАЦИИ ЖИДКОСТЕЙ**

Досліджено процеси знегажування води й видалення солей за допомогою потужних акустичних імпульсів. Запропоновано модель, що пояснює механізм цих процесів.

Исследованы процессы обезгаживания воды и удаления солей с помощью мощных акустических импульсов. Предложена модель, которая объясняет механизм этих процессов.

Очистка воды от примесей является актуальной задачей. Известен ряд способов выведения растворимых примесей из водных сред. Наибольшее применение находят методы с минимальными энергозатратами и простой аппаратной базой. Ультразвуковые технологии совместно с флотационными технологиями издавна используется в промышленности для очистки воды. Мы исследовали процессы удаления нерастворимых примесей с помощью мощных акустических импульсов [1, 2], однако не был выяснен механизм этих процессов.

Експерименти проводились на вакуумній моченій машині, см. рис. 1,а. і состоящей из вакуумной камеры, объемом  $\approx 60$  л, заполненной 20 л воды, импульсного газодинамического излучателя представленного на рис 1, пьезоакустического датчика, контролирующего амплитуду и спектр звуковых колебаний, располагавшегося в жидкости и системы контроля прозрачности жидкости. В процессе исследований был применен пневмоизлучатель, схематический вид которого приведен на рис. 1,б.

Ета система состояла из 200 Ваттної освітлювальної лампи, мільватного лазера, с длиной волны 602 нм, фотодиода с системой регистрации величины светового сигнала. Система регистрации и излучатели находилась вне вакуумной камеры, за оргстеклянными фланцами диаметром 200 мм, по диаметру камеры, напротив друг – друга, что позволяло контролировать прозрачность жидкости по всему объему. Камера вакуумировалась.

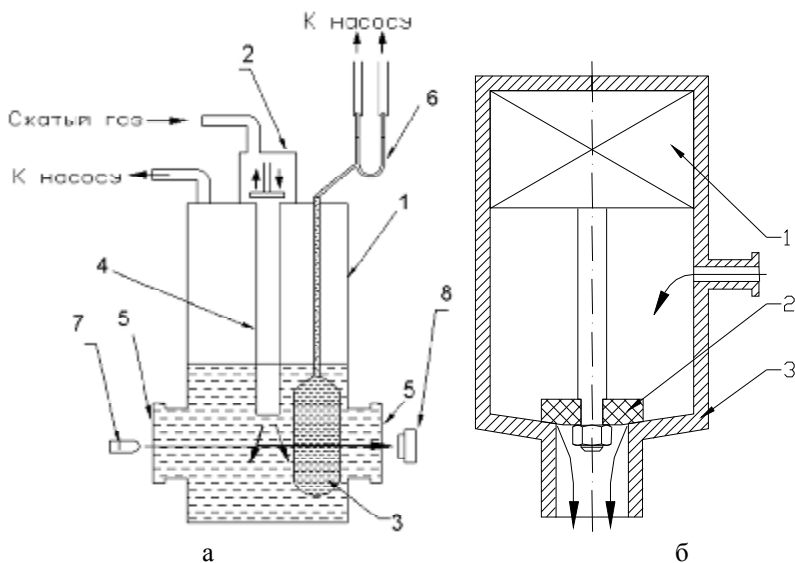


Рис. 1. а – Схема установки дегазации и выведения солей из жидкости и схематический вид излучателя. 1 – вакуумная камера, 2 – импульсный акустический пневмоизлучатель, 3 – герметичный относительно вакуумной камеры объем, не насыщенная солевая ванна, откачиваемый одновременно с объемом – 1, 4 – ствол, 5 – смотровые окна, 6 – U-образный жидкостной манометр и система накопления находятся при том же давлении, что и основной объем – 1, 7 – милливаттный лазер, с длиной волны – 602 нм, 8 – фотодиод; б – Схематический вид излучателя с электросхемой питания 1 – электромагнит, 2 – запорный элемент излучателя, 3 – герметичный корпус

Вид и длительность акустического сигнала, генерируемого газодинамическим излучателем представлен на рис. 2. Как видно, длительность сигнала составляет около 30 мс, максимальная мощность около 10 кВт. Результаты контроля уровня прозрачности жидкости представлены на рис. 3 (для импульсов от 1 до 12).

Видно, что после прохождения токового импульса, необходимого для открытия газодинамического клапана и связанного с ним акустического сигнала – около 30 мс, газ далее, в течение 1 с, проходит через водную среду (всплытие газового пузыря – первый максимум на осциллограмме). В это время прозрачность воды стала нулевой, и частично восстанавливается по прошествии приблизительно около 1 с, то есть после всплытия и рассасывания газового пузыря.

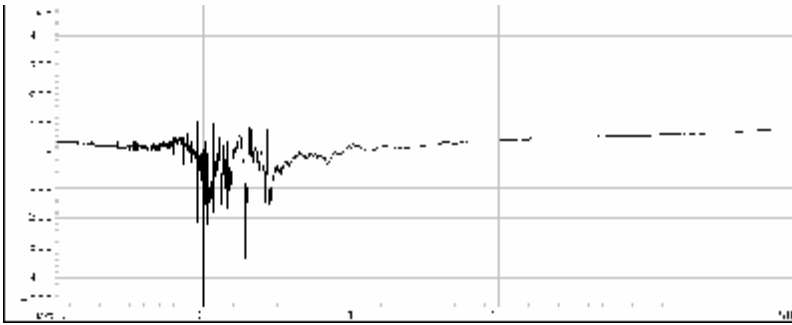


Рис. 2. Вид акустического сигнала пневмоизлучателя

Однако, вскоре жидкость снова теряет прозрачность и далее во всем объеме жидкости появляются мелкие пузырьки газа, которые постепенно растут – второй максимум на осциллограмме. По мере роста пузырьки начинают всплывать, к поверхности раздела жидкость-вакуум (газ) и среда постепенно просветляется.

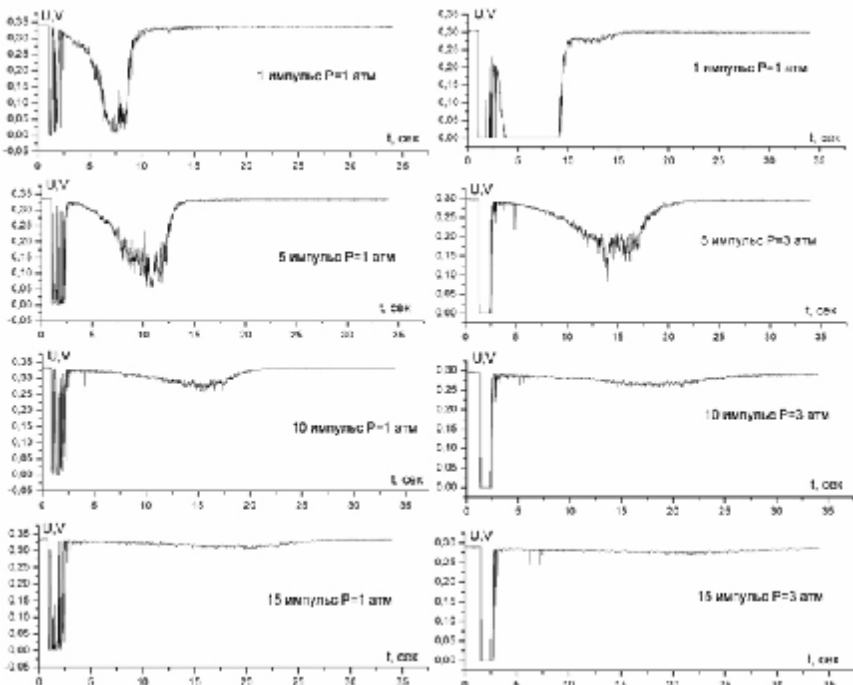


Рис. 3. Зависимость прозрачности воды от номера импульса (слева для водопроводной воды, справа для дистиллированной воды), видно, что дистиллированная вода обезгаживается быстрее

Как видно, из кривых рис. 3 жидкость полностью непрозрачна при дан-

ном уровне мощности импульсов, вплоть до седьмого. Для 15-го импульса прозрачность среды уже меняется мало, однако, на кривых наблюдаются некие флуктуационные колебания прозрачности,  $\pm 10\%$ . Газообразование в объеме жидкости и газовыделение с поверхности от импульса к импульсу уменьшается (рис. 4).

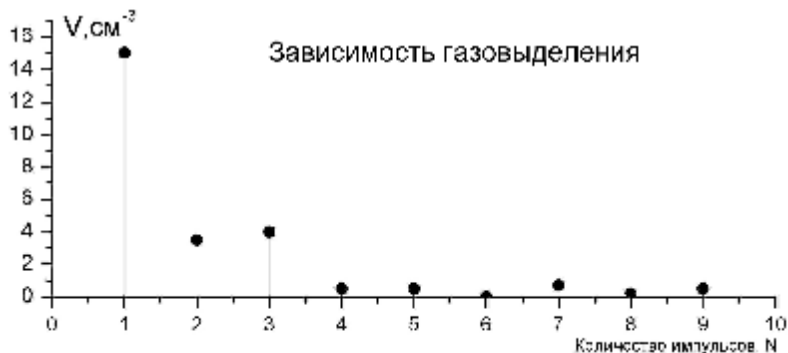


Рис. 4. Зависимость газовыделения от количества импульсов

К сожалению, эти измерения были в другой серии и не сопровождалась измерениями прозрачности, однако имели большую мощность импульса, чем в случае рис. 3. Обращает внимание также определенная цикличность в величинах газовыделения.

При сохранении озвученной жидкости под вакуумом, при дальнейших импульсах, прозрачность среды, связанная с газообразованием почти не изменяется. Развакуумирование приводит к восстановлению газообразования в объеме жидкости, зависящему от длительности процесса взаимодействия газа с дегазированной жидкостью, то есть определяется скоростью процесса растворения газа. Следует заметить, что, как видно из кривых рис. 2, простая инъекция газа в объем жидкости к существенному растворению газа не приводит, очевидно, из-за малости поверхности массообмена, малой величины растворимости воздуха и краткосрочностью процесса всплывания большого газового пузыря.

Как видно из кривых рис. 3 скорость роста пузырьков и скорость их всплывания (см. передний и задний фронты импульсов) уменьшается от импульса к импульсу, т.е. с уменьшением концентрации газа в жидкости. Передний фронт второго импульса становится все более пологим. Задний фронт импульса также затягивается, что может свидетельствовать об уменьшении скорости роста и всплывания пузырей. Картина наблюдаемого нами эксперимента, казалось бы, отличается от ожидаемой, на основании работы [4], где рост пузырьков прекращался с выключением ультразвукового излучателя и определялся действием силы Бьеркнеса. В нашем случае – первоначальный короткий импульс вызывал рост зародышей и пузырьков и через большое

время после прохождения импульса, что заставляло предположить либо наличие длительно затухающих акустических колебаний (эффект колокола – интенсивностью, не фиксируемой нашими датчиками), либо возможного действия светового излучения, исследованного в [6, 7], либо их совместного действия.

В процессе исследований дегазации жидкостей под действием импульсных акустических полей [3] возникло предположение о возможности использования этого процесса для выведения солей из растворов, подобно эффекту флотации, только на микро уровне. Действительно, в процессе образования из зародышевой фазы газовых пузырьков, т.е. образования поверхности раздела двух фаз с не компенсированной поверхностной энергией, при субатомных размерах последней, на эту поверхность могут диффундировать из объема жидкости атомы и ионы солей, т.е. на этой поверхности может происходить адсорбция примесей-ионов и субатомных агрегатов. При субатомных размерах пузырьков – поверхность раздела могла достигать сотен  $m^2/g$ , при таких величинах поверхностей исключить роль сорбционных процессов нельзя. В процессе дальнейшего роста газовых пузырьков они начинают всплывать, и если хватает Архимедовой подъемной силы, молекулы газа несут с собой молекулы солей, плотность которых выше плотности жидкости, примеси, таким образом, переносятся на макроскопическую поверхность раздела: жидкость – газ. На этой поверхности пузырьки распадаются и принесенные примеси в избыточной, по сравнению с раствором концентрации, находятся вблизи поверхности жидкости. В силу большого градиента концентрации и внутри жидкостных потоков эта область, с повышенной концентрацией, достаточно быстро рассасывается. Поэтому для выведения соли необходимо было создать собирающее соли устройство. На рис. 1. представлена конструкция такой системы. В вакуумный объем с пневмоизлучателем помещен дополнительный, герметичный, относительно водяной ванны, пластмассовый тонкостенный объем 3, в котором могли развиваться все процессы, не возмущенные газовыми и водяными потоками в момент инъекции. Происходящая в этом объеме дегазация формировала только направленные потоки всплывающих пузырьков, которые при всплытии удалялись из объема в систему накопления – разделения 6. В дополнительный объем был введен 3 % раствор поваренной соли. После нескольких импульсов пневмоизлучателя в нижней части системы разделения выпали кристаллы соли, окрашенные в бурый цвет. Следует заметить, что первичная, водопроводная вода содержит значительную долю солей железа, которые, выпадая в осадок после длительной выдержки всегда имеют бурую окраску. Таким образом, после звукового воздействия выпала смесь солей, находившихся в растворе. Следует заметить, что вначале раствор в системе разделения 6, был ненасыщенным, вернее просто состоял из обычной водопроводной воды, соли могли попасть туда в процессе переноса воздушными пузырьками. Через 30 импульсов, около 100 сек, концентрация соли достигла 4 %. Кроме того, в осадок, на дно

дополнительного объема 3, выпало 0.02 г солей. Помимо того солевые отложения наблюдались и на внутренней поверхности трубок системы разделения. Т.о. можно отметить наличие вполне регистрируемых величин потоков массопереноса.

В настоящее время, считаем возможным предложить модель процессов, которая, по-видимому, применима для слабосвязанных примесей. Как известно, в воде при 20 °С растворяется около 18 и 35 мл/л азота и кислорода, соответственно. Или 1 молекула азота или кислорода на 7.5 или  $3.8 \times 10^4$  молекул воды, соответственно. При равновесных условиях они находятся друг от друга на расстояниях в 42 и 34 (диаметров молекулы воды) элементарных постоянных решетки воды. Т.е. при объединении 8-ми частиц в зародыши газовой фазы, расстояние между зародышами возрастет вдвое. Следует заметить, в обычной воде концентрация солей (1-3 г/л) почти на 2 порядка больше концентрации молекул растворенных газов. Отсюда, расстояние между ними составляет 8-9 диаметров молекул воды. Для морской воды это расстояние уменьшается еще в 2-2,5 раза. То есть, казалось бы, любое взаимодействие между атомами примесей экранируется силовым полем воды. В условиях УЗ – облучения силы Бьеркнеса приводят к росту газовых пузырьков-зародышей. Очевидно, что идет рост всех зародышей, не только газовой фазы. С другой стороны, наличие примесей-газов ослабляет связи вода = вода вблизи примесного зародыша, и его рост может определяться вытеснением примесей молекулами воды.

Кластерная гипотеза строения воды, не имеющая смысла для чистого – беспримесного случая, приобретает при наличии примесей совершенно новую основу. Действительно, при отсутствии примесей, малая величина сил водородных связей по сравнению с величиной кТ, делает неопределенными границы столь динамического образования. Пузырьки газа и примесные зародыши по своей энергетической сути могут задавать границу водяного кластера (легкая жидкость на границе с тяжелой). Или иными словами пузырьки скапливаются и таким образом задают границу (или создают). Элементарный плоский кластер воды из 5 атомов или объемный из 60-70 атомов является, возможно, чисто теоретическим образованием или возможен при большой концентрации примесей, см. рис. 5, а, б.

В то же время кластеры микронных размеров, с суммарной площадью поверхности 5-10 м<sup>2</sup>/г, с границами из воздушных или примесных пузырьков-зародышей толщиной в 3,5-10 А могут оказаться вполне реальными образованиями, см. рис. 6. Кстати, наличие примесных пленок на границах кластеров – увеличивает подвижность примесей, подобно зернограницной диффузии в твердых телах.

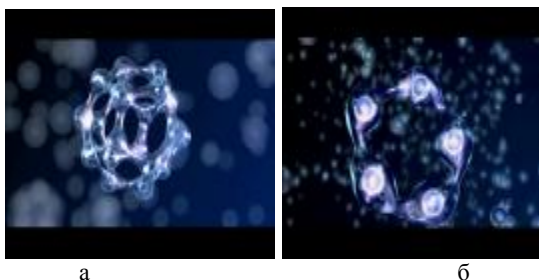


Рис. 5. Элементарные кластеры воды: а – объемный б – плоский



Рис. 6. Водные кластеры микронных размеров с границами из примесей и пузырьками-зародышами

Отсюда совсем не следует, что внутри кластеров совсем нет примесей. Объем внутри динамического элементарного объемного кластера является аналогом микропоры, подобной ячейке цеолита. Только ее существование, существование кластера, стабилизируется наличием в нем примесных молекул. Во время импульса давления (включение пневмоизлучателя) на переднем фронте распространяющейся акустической волны происходит сжатие и сдвигка пузырьков и зародышей примеси (в основном, на границах кластеров), приводящее к их столкновениям и последующему росту размеров. При этом в пузырьках и зародышах могут содержаться разнородные молекулы, т.е. молекулы и газов и солей. Положительной подъемной силой, по видимому, будут обладать пузырьки, в которых отношение концентраций газ-соль будет на уровне не менее 2-3 и более. При меньших величинах отношений эти пузырьки всплывать не будут, несмотря на их рост и размеры. Поэтому, по мере дегазации воды, от импульса к импульсу, см. рис. 3 время восстановления полной прозрачности все возрастает. Пузырьки-зародыши достигают размера, порядка длины волны видимого света, т.е. около  $2-3 \times 10^3 \text{ \AA}$ , являющиеся причиной не прозрачности жидкости частично всплывают, а частично рассасываются, т.е. уменьшаются в размерах (в эксперименте используется не насыщенный раствор). Поэтому для выведения солей необходимо постоянное растворение газа в жидкости – подпитка. Как указывалось,

простая инъекция газа в объем жидкости к такому растворению газа не приводит, в то же время, наличие смешанных зародышей, не всплывающих пузырьков, делает процесс полной дегазации при наличии солей проблематичным.

**Выводы.** Как показали экспериментальные исследования предложенного метода очистки воды от примесей в акустических полях с широким спектром частот, получен положительный результат. Применение предложенного импульсного метода очистки жидкостей в промышленном производстве и других отраслях может привести к снижению энергопотребления, и созданию более экологически чистого процесса очистки, что в настоящее время представляется достаточно актуальным.

**Список литературы:** 1. В.Б. Юферов, Ю.В. Холод, Е.В. Муфель, В.М. Шулаев. Дегазация закаленно-охлаждающих водоподобных сред звуковыми импульсами // ОТТОМ-2, Сборник докладов. Сентябрь 10-14, 2001, Ч. 1, С. 126-129. 2. В.Б. Юферов, Ю.В. Холод, А.Н. Рыбалко, Е.В. Муфель, В.Ф. Малец, А.Н. Озеров, В.П. Слюсарь. О возможности вывода солей из растворов под воздействием акустических волн // ВАНТ Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (82), 2002, № 6, с. 149-151. 3. 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. 4. Б.Г. Емец. О влиянии электромагнитных волн оптического диапазона на жидкости. // Вісник Харківського національного університету. № 513. радіофізика та електроніка. 2001, Вип. 1. с. 74-80. 5. Б.Г. Емец. Ефекти взаємодії низькоінтенсивних електромагнітних хвиль з нанорозмірними газовими включеннями в рідких середовищах. Автореферат докторської дисертації. Харків. 2004.

*Поступила в редколлегию 09.11.07*