

В.В. Гончарук, В.В. Маляренко

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ЗВУКА В ВОДЕ

Изучено поглощение звука частотой 1 кГц и интенсивностью 10^{-15} – 10^{-14} Вт/см² в дистиллированной воде при различных условиях освещения образцов, обработки магнитным полем и ультразвуком. Установлено различие поглощения звуковых сигналов для воды в неодинаковых условиях объясняется изменением вязкости вследствие изменения структурного состояния воды, в частности разрушения или образования кластеров.

В последнее время много внимания уделяется явлению кластерообразования в воде, памяти воды и других аномалий, обусловленных способностью молекул воды участвовать в межмолекулярных водородных связях [1–3]. Приверженцы классического подхода к структуре жидкостей считают, что продолжительность жизни образующихся кластеров воды очень короткая (порядка 10^{-12} с), в результате кластеры, как мерцающие образования со столь коротким временем существования, не могут заметно влиять на свойства воды. Сторонники идей о структуризации воды предполагают, что кластеры в воде могут сохраняться длительное время, и поэтому существование ассоциатов в ряде случаев нельзя игнорировать.

По нашему мнению, свойства воды (физические, химические, физико-химические) в своей основе целиком доминируются структурным состоянием воды, которое зависит от кластерного состава воды, т.е. от размера и концентрации кластеров. В настоящее время экспериментально установлено существование в воде гигантских гетерофазных кластеров воды (ГГКВ) [4], имеющих размеры 5–50 мкм и более. О существовании в воде кластеров малых размеров судят плавным образом на основании результатов расчетных методов, и это позволяет скептикам отстаивать позицию, что существование структуризации или ее проявление в свойствах воды экспериментально не подтверждено [3].

Одной из причин, из-за которых трудно обнаружить кластеры малых размеров, является деформирующее ближнюю структуру воды воздействие методов исследования. Известно, что при отсутствии водородных связей вода имела бы значительно более низкие температуры плавления и кипения. В температурном диапазоне существования жид-

кой воды изменчивы прочность, угловые параметры и количество водородных связей. По сути, величина энергии Н-связей воды (18,8 кДж/моль) определяет все процессы, связанные с изменением ближней структуры воды. При более низких энергиях воздействия (при температуре, не превышающей $\approx 80^\circ\text{C}$) структурные образования в воде разрушаются частично. Рассмотрим воздействие на воду различных методов исследования, и то, как это влияет на структуру воды.

Можно допустить, что разрушение кластерных структур сопряжено с изменениями $Q_{\text{кл}}$ порядка 10 % от энергии водородных связей воды (т.е. $Q_{\text{кл}} \approx 1,881$ кДж/моль). Величина вполне реальная для комнатных температур, при которых молекулы воды структурированы либо в первичные льдоподобные агрегаты, либо во вторичные кластеры. В табл. 1 для сравнения приведены энергии излучений, воздействующих на воду при спектральных исследованиях.

Таблица 1. Область спектра и соответствующая ей энергия излучения [5]

Спектральная область	Частота излучения, Гц	Энергия излучения, кДж/моль
Гамма-излучение	10^{19}	$3,9 \cdot 10^6$
Рентгеновское излучение	10^{17}	$3,9 \cdot 10^4$
УФ-область	$(1,5 \div 0,75) \cdot 10^{15}$	$597 \div 298$
Видимая область	$3,8 \cdot 10^{14}$	$51,3$
Ближняя ИК-область	$2,10^{14}$	$50,1$
Колебательная ИК-область	$2,5 \cdot 10^{13}$	$10,0$
Дальняя ИК-область	10^{12}	$0,39$
СВЧ-область	10^9	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Короткие радиоволны	$1,5 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
Телечастоты	$5,5 \cdot 10^5$	$6,1 \cdot 10^{-8}$
Длинные радиоволны	$3 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^{-10}$
Силовые электроустановки	$3 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-14}$

Как видно из приведенных в таблице данных, большинство спектральных методов оказывают сильное воздействие на изучаемые объекты. В случае воды это может привести к разрушению малых кластеров, точнее говоря, к мерцанию их структуры, т.е. к изменению формы и размеров.

Например, воздействие рентгеновского метода в $2 \cdot 10^4$ раз превышает величину $Q_{\text{кл}}$. Соответствующие таким энергиям переходы валентных электронов осуществляются независимо от того, входят ли молекулы воды в надмолекулярные образования, что сопровождается разрушением ближней структуры воды и, соответственно, малых кластеров.

Излучение в видимой области спектра превышает $Q_{\text{кл}}$ в 80,4 раза. Понятно, что если в воде были малые кластеры, то при освещении происходит их непрерывная реструктуризация вследствие переходов валентных электронов под влиянием света. В комбинированных методах с использованием монохроматических источников света (например, лазерно-акустический [6]) действие последнего может быть уменьшено подбором частоты. Необходимо отметить, что такое воздействие может не затронуть структуры ПГКВ, так как для последних существуют другие механизмы их стабилизации [4].

Приемлемой, с точки зрения минимального воздействия метода исследования на кластеры, является дальняя ИК-область. При этом излучение прибора превышает $Q_{\text{кл}}$ всего в 2,07 раза.

Более слабые воздействия оказывают методы, в которых используются короткие радиоволны (ЯМР, ЭПР, ДЭЯР и др.). Однако в этих методах образец воды, кроме электромагнитного облучения (ВЧ, СВЧ), подвергается влиянию сильных магнитных полей, что оказывает неучтенное действие на воду и ее примеси.

Различна энергетика акустических методов исследования. Вследствие поглощения сигнала исследуемой средой в ультразвуковых методах применяемая величина интенсивности звука (I) составляет не менее $10^{-4} \div 10^{-6}$ Вт/см². Для наглядности можно указать, что авиамотор на расстоянии 5 м создает интенсивность звука 10^{-4} Вт/см². Под действием сильной вибрации в жидкости могут разрушаться надмолекулярные структуры. Соответственно, для ультразвуковых методов плотность энергии звука (I/c), при скорости звука в воде $c \approx 1498$ м/с, равна $7 \cdot 10^{-9} \div 7 \cdot 10^{-11}$ Дж/см³, что составляет $10^{13} \div 10^{11}$ кТ/см³ при $T \approx 300$ К ($kT = 4,14 \cdot 10^{-21}$ Дж).

В данной работе проведено исследование воды на частоте $f \approx 1$ кГц при интенсивности сигнала $10^{-15} \div 10^{-14}$ Вт/см², т.е. $10 \div 20$ дБ (порог слышимости сигнала частотой 1 кГц составляет 10^{-16} Вт/см²). Плотность энергии звука при этом равна $6,6 (10^{-19} \div 10^{-18})$ Дж/см³, что составляет от $2,4 \cdot 10^4$ до $2,4 \cdot 10^6$ кТ/см³.

Амплитуда давления звуковой волны (θ) при исследовании водных систем на звуковых частотах значительно ниже, чем на ультразвуковых частотах. Так, если при частоте $f = 1$ мГц величина $\theta \approx 1,7 \cdot 10^4$ Па ($\theta \approx \rho c \omega A$, где ρ — плотность воды, $\omega \approx 2\pi f$, A — амплитуда смещения частиц), то при частоте 1000 Гц амплитуда давления составляет всего $5,5 \cdot 10^{-4}$ Па. Ясно, что при таких низких давлениях следует ожидать значительно меньшего возмущающего действия метода исследования на слабосвязанные структуры в воде типа кластеров. Наглядной величиной является амплитуда деформации (δ), развиваемой в звуковой волне ($\delta \approx \omega A/c$).

Если при частоте $\nu = 7,7 \cdot 10^{-7}$ см, то при использованной нами частоте ν в Гц величина δ составляет всего $2,4 \cdot 10^{-14}$ см. Следовательно, при звуковых сигналах низкой частоты и малой интенсивности амплитуда смещения и амплитуда деформации значительно меньше размеров элементов структуры исследуемого материала (т.е. атомов и молекул воды).

Блок-схема установки для изучения поглощения звука малой интенсивности частотой 1 кГц при прохождении через слой воды представлена на рис. 1.

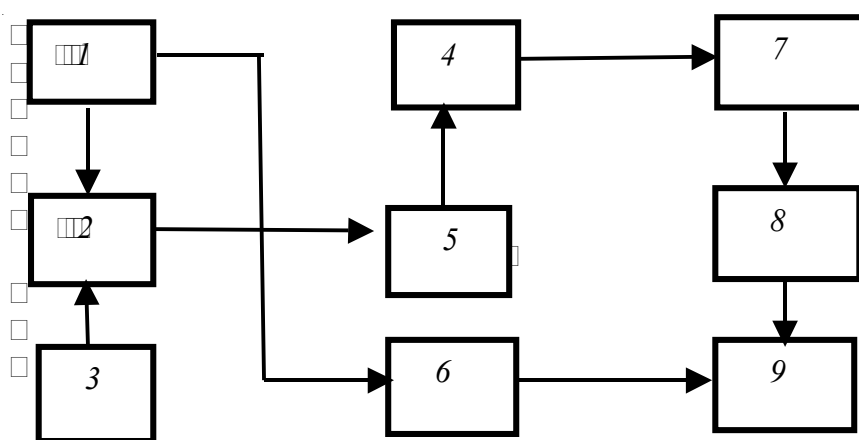


Рис. 1. Блок-схема установки для изучения поглощения звука в воде

Синусоидальное напряжение от генератора сигналов (1) типа ПЗ-33 подавали на излучатель измерительной ячейки (2), с помощью которого создавались колебания малой интенсивности в воде, заполняющей ячейку. На фиксированном расстоянии от вибратора помещали приемник сигналов, соединенный через блок согласования (5) с предварительным усилителем (4) типа УЗ-29. Ячейка объемом $10 \times 10 \times 5$ см³ была снабжена кожухом для термостатирования и светоизоляции, температуру поддерживали термостатом (3) с точностью $\pm 0,05^\circ\text{C}$. Для исключения влияния вибраций и звуковых помех ячейка была снабжена звукоизолирующим корпусом.

С помощью микрометрического винта устанавливали расстояние (1) между излучателем и приемником от 0,1 до 3,0 см с точностью $\pm 0,01$ мм. Сигнал после предварительного усиления поступал на усилитель (7) типа УЗ-29-2, затем, пройдя полосовой фильтр (8), поступал на двухлучевой осциллограф (9) типа ОУ-69 или через АПЦ на компьютер. Схема содержала также калибратор (6), представляющий собой делитель, через который сигнал с генератора поступал на второй луч осциллографа, минуя

оптический путь.

На данной установке чрезвычайно малая плотность энергии звука (порядка $6,6 \cdot (10^{-19} \div 10^{-18})$ Дж/см³) позволяла вносить минимальные возмущения в структуру исследуемого образца воды. Например, для нагрева воды на 1°С необходимо было затратить 4,18 Дж/см³, что составляло 0,42% энергии разрыва водородных связей. При интенсивности излучателя 10^{-15} Вт/см² (10 Дб) объемная энергия звука ($6,6 \cdot 10^{-19}$ Дж/см³) ничтожно мала по сравнению с энергией, необходимой для ощутимого нагревания воды или разрыва водородных связей. Вследствие малости амплитуды звуковых колебаний затруднены сдвиговые смещения, которые определяют структурную вязкость.

Коэффициент поглощения звука α находили по формуле [7]

$$\alpha = [1/2(l_2 - l_1)] \ln(Y_1/Y_2), \quad (1)$$

где Y_1, Y_2 — величина сигналов для расстояний l_1 и l_2 .

На рис. 2 приведена зависимость величины сигнала Y от расстояния до излучателя и рассчитанный из этих данных коэффициент поглощения α_0 при различной интенсивности сигнала излучателя в дистиллированной воде при 20°С и освещении рассеянным светом поверхности образца 50 лк.

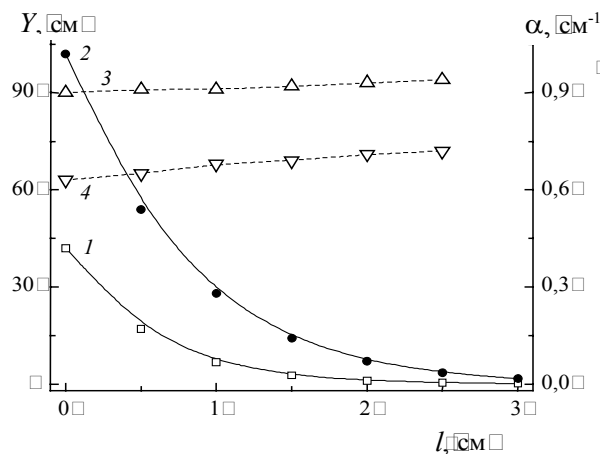


Рис. 2. Зависимость величины сигнала Y (1, 2) и коэффициента поглощения α (3, 4) от расстояния между излучателем и приемником в дистиллированной воде. Интенсивность сигнала источника: $1 \cdot 10^{-15}$ (1,3), $2 \cdot 10^{-15}$ Вт/см² (2,4); $f = 1$ кГц; $T = 20^\circ\text{C}$. Величину α измеряли для освещенного образца

На рис. 2 показана также зависимость величины Y и α для образца воды, находившейся в темноте и при экспозиции светом. В табл. 2 приведены результаты определения величины α_0 воды при различных видах обработки.

Таблица 2. Поглощение звука водой при различных видах обработки

Образец воды	$\alpha, \text{см}^{-1}$		
	Условия освещения		
	в темноте	на свету	
	18 ч	15 мин	4 ч
Дистиллят	0,81	0,80	0,65
Бидистиллят	0,86	0,84	0,65
Дистиллят в магнитном поле 80 мТл	0,87	0,85	0,65
Дистиллят при более высокой интенсивности звука ($I \approx 3 \cdot 10^{-14} \text{Вт/см}^2$)	0,66	0,58	0,51
Дистиллят обработан ультразвуком (0,1 Вт/см ² в течение 0,5 мин)	–	0,64	0,65
Водопроводная вода (с электропроводностью $5 \cdot 10^{-5} \text{ом}^{-1} \text{см}^{-1}$)	0,70	0,69	0,68

Опыты показали, что величина звуковых сигналов малых интенсивностей в воде при отсутствии внешних воздействий сохраняется постоянной длительное время. Величина сигнала при одинаковых условиях опыта (мощность излучателя, расстояние от излучателя, температура и др.) зависит от структурных изменений, происходящих в воде.

Величина Y уменьшается при удалении от излучателя (рис. 2) вследствие затухания звука, коэффициент поглощения α уменьшается при увеличении интенсивности сигнала излучателя от $1 \cdot 10^{-15}$ до $2 \cdot 10^{-15} \text{Вт/см}^2$. Известно, что в жидкостях поглощение звука определяется преимущественно вязкостью. Для воды при частоте 1 кГц релаксационное поглощение звука отсутствует [8], и величина α зависит от структурной вязкости. Согласно формуле Стокса с поправкой на объемную вязкость [9], возрастание поглощения звука свидетельствует об увеличении структурной вязкости:

$$\alpha = \omega^2 (4\eta_c/3 + \eta_v) / 2\rho c^3 \quad (2)$$

где η_c – сдвиговая вязкость, η_v – объемная вязкость, $\omega = 2\pi f$, ρ – плотность.

Известно, что понятие объемной вязкости, как составляющей структурной вязкости, используется в акустике для объяснения потерь вязкости при деформациях всестороннего сжатия, которыми сопровождаются звуковые волны в жидкости [7]. Энергия звуковой волны расходуется на преодоление объемной вязкости η_v , возрастающей, как показали опыты, по мере ослабления амплитуды колебаний.

Формула (2) хорошо выполняется при высоких частотах и высоких интенсивностях звука и не работает при звуковых частотах в случае очень слабых интенсивностей звука. Если при обычных измерениях (при интенсивности сигнала 10^{-5} – 10^{-4} Вт/см² и частоте 10^6 – 10^9 Гц) для воды выполняется соотношение $\eta_c \approx 3\eta_v$ [10], то при интенсивности звука 10^{-15} Вт/см² силы, вызывающие продольное движение (вдоль направления распространения волны) жидкости, не способны активизировать передачу энергии из-за малости воздействия и деформации молекулярных связей в воде. Увеличение сдвиговой и объемной вязкости при малых интенсивностях сигнала может быть обусловлено одним и тем же механизмом, например сопротивлением к изменению ориентации молекул воды, или кластеров воды. Именно с этим можно связать наблюдаемую экспериментально (рис. 2) быструю потерю интенсивности сигнала при удалении от излучателя и высокие значения коэффициента поглощения, сравнимые с величиной α для жидких кристаллов [11], или с α для очень высоких частот.

Как установлено, поглощение звука малой интенсивности в воде зависит от того, находится ли образец воды в темноте или подвергается экспозиции светом. Определение поглощения звука проводили: после пребывания образца воды в темноте в течение 18 ч, непосредственно после снятия затемнения образца и через 4 ч экспозиции светом (рис. 3). Для дистиллированной воды, находящейся в темноте, кривая затухания звука $Y - I$ расположена ниже, чем для освещенного образца. Это свидетельствует о том, что в воде, находящейся в темноте (т.е. в условиях, когда вода защищена от влияния электромагнитных излучений), звуковая волна теряет интенсивность больше, чем при прохождении освещенной воды. Рассчитанный по формуле (1) коэффициент поглощения звука для затемненных образцов воды оказывается больше, чем для освещенных образцов (рис. 3).

Роль фактора освещение/затемнение образца в большей степени проявляется для более чистой воды. Как видно из табл. 2, в дистиллированной воде изменение величины α больше, чем в дистиллированной, а на поглощение звука водопроводной водой изменение режима освещения практически не влияет. В указанной таблице приведены результаты измерения поглощения звука частотой 1 кГц, интенсивностью $2 \cdot 10^{-15}$ Вт/см²

при 20°C. Увеличение интенсивности сигнала излучателя (в данных опытах в 15 раз) приводит к уменьшению эффекта затемнения и уменьшению поглощения звука водой (табл. 2).

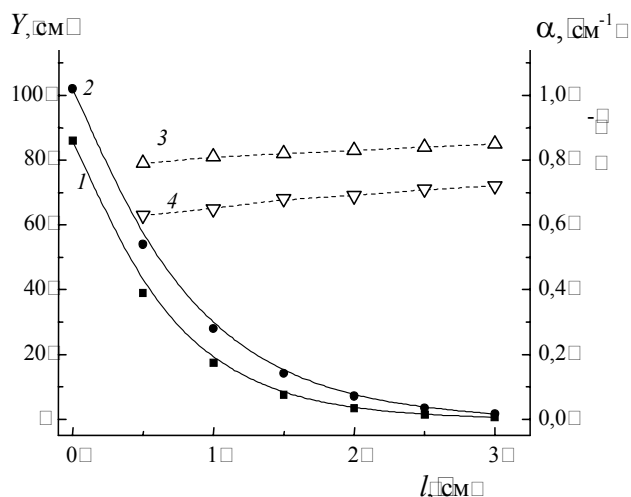


Рис.3. Зависимость величины сигнала Y (1, 2) и коэффициента поглощения α (3, 4) от расстояния между излучателем и приемником в дистиллированной воде: 1, 3 – образец находился в темноте в течение 18 час; 2, 4 – образец находился на свету в течение 4 ч. $I = 2 \cdot 10^{-15} \text{ Вт/см}^2$, $f = 1 \text{ кГц}$, $T = 20^\circ\text{C}$

На основании полученных результатов можно предположить, что макроструктура воды в условиях минимума внешних воздействий (в данном случае вода защищена от светового излучения, шумов звукового излучения, и защищена металлическим экраном от воздействия низкочастотных электромагнитных излучений) постепенно (в течение нескольких часов) перестраивается, и потери энергии при прохождении звука становятся больше. Так как средняя по объему плотность образца в измерительной ячейке не изменяется, то эффект может быть объяснен увеличением вязкости жидкости. Вследствие образования малых кластеров уменьшается количество несвязанных молекул воды, что затрудняет увеличение вязкости и, согласно (2), прохождение звуковых волн.

Для понимания изменения величины α в зависимости от режима освещения необходимо учесть следующее. Известно [12], что по своей сжимаемости жидкости при малых механических воздействиях приближаются к твердым телам. Это обусловлено тем, что не успевают происходить реакции, способствующие перераспределению молекул под влиянием внешнего воздействия. Молекулы, как и в твердых телах, при малых ам-

плитудах колебаний почти не изменяют своего положения. Энергия звука при этом максимально поглощается (2) за счет превалирующей силы внутреннего трения (т.е. объемной акустической вязкости η_v), вклад которой возрастает по отношению к силе звуковой волны при уменьшении интенсивности звука. Поэтому α оказываются высокими и возрастают при отсутствии освещения за счет образования кластерных структур, увеличивающих вязкость воды. Сравнивая результаты, приведенные на рис. 1 и 2, можно сделать также вывод о том, что звук, даже малой мощности, оказывает некоторое влияние на макроструктуру воды, хотя и не такое сильное, как световое излучение.

Из данных табл. 2 следует, что, во-первых, водопроводная вода имеет более высокий коэффициент поглощения слабых звуков, чем дистиллированная. Во-вторых, фактор затемнение/экспозиция на водопроводную воду влияет значительно слабее. Оба эти эффекта, по-видимому, связаны с тем, что в водопроводной воде более высока концентрация примесей ионов металлов и молекулы воды в большей степени связаны в гидратные оболочки ионов, чем в кластеры, так как энергия гидратации ионов значительно выше энергии Н-связей воды. На влияние ионов указывает также более высокий коэффициент поглощения слабых звуков биодистиллированной водой по сравнению с дистиллятом (для образцов, не подвергнутых экспозиции). Поэтому можно сделать вывод, что если вода не подвергнута активирующему влиянию света, то кластерообразование (или, вообще, структурирование, если учитывать другие модели) протекает более сильно при отсутствии ионов, которые перестраивают структуру воды в структуру гидратных оболочек.

Вследствие частичного разрушения малых кластеров при переходе воды из условий затемнения к экспозиции светом, по-видимому, на свету вода имеет более рыхлую структуру, т.е. структуру, характерную для более высокой температуры. По аналогии с представлениями о влиянии ионов на структурную температуру воды [13], можно предположить, что структурная температура воды в условиях экспозиции светом ниже, чем в темноте. Это значит, что, например, при 20°C вода в темноте обладает структурой, которую она на свету имеет при более низкой температуре. Конечно, эффект изменения структурной температуры от образования кластеров воды значительно меньше, чем от образования гидратных оболочек ионов, так как энергия поляризующего действия ионов, судя по тепловым эффектам в растворах, значительно больше, чем кластеров.

При одновременном действии затемнения образца воды и магничивания в течение 18 ч полем с индукцией ≈ 80 мТл наблюдается некоторое увеличение поглощения звукового сигнала (табл. 2), которое затем, после снятия магнитного поля и экспозиции светом, уменьшается до значе-

ния, характерного для дистиллированной воды в условиях освещения. Следовательно, постоянное магнитное поле при длительном воздействии способствует увеличению вязкости затемненной воды. По-видимому, в магнитном поле кластерообразованию способствует медленно протекающая миграционная поляризация [14].

В поляризации участвуют заряженные кластеры, т.е. дипольные молекулярные частицы, несущие электрические заряды, в результате неполной стехиометрической компенсации их при образовании кластера. Неполная компенсация зарядов молекул воды происходит в результате деформирования молекул или вследствие неравноценности состояния молекул внутри и на поверхности кластера воды аналогично другим структурам. Образование поверхностного заряда у кластера неизбежно вызывает его поляризацию под воздействием внешних полей.

Кластер можно моделировать как дисперсную частицу двойным электрическим слоем, обеспечивающим силы отталкивания соседних кластеров. В этом случае воду можно рассматривать как суспензию кластеров, причем концентрация дисперсной фазы (т.е. кластеров) в такой суспензии зависит от внешних условий (температура, наличие примесей и др.). Внешнее электрическое или магнитное поле поляризует кластеры подобно частицам дисперсной фазы. Такие возможности кластерной модели по сравнению с континуальной мы считаем преимуществом. Континуальная модель структурирования воды, по-видимому, более пригодна для низких температур, в частности в условиях переохлаждения воды [15].

Из результатов опытов следует, что даже слабое постоянное магнитное поле при длительном воздействии способно оказывать влияние на структуру дистиллированной воды, которая не подвержена влиянию излучений. Для воды, находящейся на свету, как показали опыты, обработка магнитным полем в течение 3 сут не приводит к изменению величины α . Произошедшее под действием магнитного поля в затемненном образце воды изменение структуры после снятия магнитного поля постепенно исчезает, и структура воды приобретает первоначальное состояние. Краткое воздействие на воду ультразвуковой обработкой ($f \equiv 22$ кГц, $I \equiv 0,1$ Вт/см², $\tau - 0,5$ мин) ускоряет процесс уменьшения α до величины, характерной для освещенного образца воды. Это также подтверждает факт, что при воздействии света происходит уменьшение вязкости образца воды за счет разрушения кластерной структуры; ультразвуковая обработка ускоряет процесс разрушения вторичных структур.

Таким образом, благодаря очень слабому возмущающему действию данного метода исследования на воду зафиксированы величины α , свидетельствующие об изменениях вязкости, обусловленных перестройкой кластерной структуры под влиянием различной освещенности образца.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что основным состоянием структуры воды следует считать состояние, которое она имеет, находясь защищенной от света, вибраций, различных электромагнитных излучений и в отсутствие растворенных веществ. В этом случае в воде выполняется истинное равновесие между кластерными структурами и не связанными молекулами воды. Освещение или иное воздействие приводит к постепенному разрушению кластеров и переходу воды из основного состояния в другие, характерные для данного воздействия.

Резюме. Поглощения звука частотой 1 кГц интенсивностью 10^{-15} – 10^{-14} Вт/см² вивчено у дистильованій воді за різних умов освітлення зразків, обробки магнітним полем і ультразвуком. Встановлена різниця поглинання сигналів для води у різних умовах пояснюється зміною в'язкості внаслідок зміни структурного стану води, зокрема, руйнування або утворення кластерів.

V.V. Goncharuk, V.V. Malyarenko

THE STUDY OF SOUND ABSORPTION IN WATER

Summary

The sound absorption of frequency 1 kHz, intensity 10^{-15} – 10^{-14} W/sm² was studied in distilled water at various conditions of a lighting, the treatment of a magnetic field and ultrasonic. The fine distinction of sound absorption for water in different conditions is explained viscosity changes from reversal of water structure form, in particular, destruction or formation of a clusters.

1. Liu K., Cruzan J. K., Saykally R.J. // Science. 1996. N5. P. 929–993.
2. Neilson G.W., Mason P.E., Ramos S., Sullivan D. // Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A-Math. Phys. Eng. Sci. 2001. 359, N8. P. 1575–1591.
3. Symons M.C.R. // Ibid. 2001. 359, N6. P. 1631–1646.
4. Смирнов А.Н., Лапшин В.Б., Бальшев А.Б. и др. // Химия и технология воды. 2005.–27, №2.–С. 11–137.
5. Гордон А., Форд Р. Спутник химика. М.: Мир, 1976. 542 с.
6. Shen Y.C., Zhang S.Y., Liu T.Z. et al. // Prog. Nat. Sci.–2001. 11, N5. P. 228–232.

7. *Физическая акустика: В 2-х т. //* Под ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 1966. – Т. 1. – 240 с.
8. *Розенберг Л.Д.* Мощные ультразвуковые поля. – М.: Наука, 1968. – 268 с.
9. *Френкель Я.И.* Кинетическая теория жидкостей. – Л.: Наука, 1975. – 592 с.
10. *Зацепина Г.Н.* Физические свойства и структура воды. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 184 с.
11. *Капустин А.П.* Электрооптические и акустические свойства жидких кристаллов. – М.: Наука, 1973. – 232 с.
12. *Шахпаронов М.И.* Механизмы быстрых процессов в жидкостях. – М.: Высш. шк., 1980. – 352 с.
13. *Мищенко К.П., Полторацкий Г.М.* Термодинамика и строение водных и неводных растворов электролитов. – Л.: Химия, 1978. – 328 с.
14. *Гончарук В.В., Малярченко В.В.* // Химия и технология воды. – 2001. – **23**, № 4. – С. 343–347.
15. *Qi K.Y., Jiang Y.* // Acta Phys. Sin. – 2000. – **49**, № 11. – P. 2214–2219.

Ин-т коллоид. химии
и химии воды им. А.В. Думанского
НАН Украины, г. Киев Поступила 12.12.2004