

УДК 534.286.2.14; 546.212:541.12.03; 551.463.27

© 1993 г. Г.А. Домрачев, А.В. Майорова, Ю.Л. Родыгин,  
Д.А. Селивановский

## ЗАТУХАНИЕ ЗВУКА ПРИ СОНОЛИЗЕ ВОДЫ

Рассматривается соотношение диссипации энергии акустического поля и энергии, необходимой для появления перекиси водорода в воде, экспонированной звуком. Описаны собственные измерения сонолиза в докавитационном режиме и дан анализ результатов других исследований в условиях кавитации. Все результаты образуют единую последовательность значений энергии, пропорциональную квадрату частоты звука. Потери на механохимические преобразования сравниваются с величинами акустических потерь. Механохимические преобразования в воде при распространении звука могут быть заметны в механизме затухания звука.

Сонолизу воды, т.е. ее разложению под действием звука с появлением в воде перекиси водорода ( $H_2O_2$ ) и молекулярного водорода ( $H_2$ ), а также молекулярного кислорода ( $O_2$ ) как продукта разложения перекиси водорода, посвящены многие исследования, начиная с 20-х годов нашего века (практически исчерпывающая библиография приведена в [1 и 2]). Образование перекиси водорода в воде при сонолизе представляется физхимикам настолько обычной реакцией, что ею пользуются в качестве меры энергии звукового поля [2,3]. Однако, анализируя исследования по сонолизу воды, авторы данного сообщения не обнаружили попыток оценить потери акустической энергии на происходящие при сонолизе химические преобразования в воде.

Для образующегося количества перекиси, например, эти потери легко оценить (при условии, что образующаяся перекись водорода в ходе сонолиза не распадается фотолитически или каталитически в присутствии переходных металлов):  $E_{хим} = 8 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot N_A \cdot C_{H_2O_2} \cdot T$ , где  $E_{хим}$  (Дж/л) — потери энергии, отнесенные к литру воды;  $8 \cdot 10^{-19}$  (Дж) = 5 э.в. — энергия диссоциации молекулы воды  $H_2O \rightarrow H + OH$ ; стехиометрический коэффициент 2 учитывает необходимость диссоциации двух молекул воды для появления одной молекулы  $H_2O_2$  при рекомбинации двух гидроксил-радикалов,  $C_{H_2O_2}$  (М/л · с) — скорость увеличения концентрации перекиси при сонолизе воды,  $N_A$  — число Авогадро,  $T$  (с) — время сонолиза.

С другой стороны, акустические потери, также отнесенные к литру водной среды,  $E_{ак}$  можно оценить из известных коэффициентов затухания и измеренных значений интенсивности звукового поля.

По аналогии с акустическим введем эффективный коэффициент затухания  $\alpha_{хим}$ , который описывает потери в звуковом поле за счет доли распада воды, определяемой по концентрации перекиси при сонолизе.

Целью данного сообщения является: описание результатов опытов авторов по сонолизу воды на низких частотах (1–15 кГц) в докавитационном режиме; анализ существующих данных по сонолизу воды.

**Техника и результаты экспериментов.** Для опытов (которые проводились авторами в 1989–1992 гг.) были выбраны сравнительно низкие звуковые частоты: 1,2; 5,5; 15 кГц. Реакторы, в которых осуществлялся сонолиз воды, представляли собой цилиндрические стаканы из кварцевого стекла с внутренним диаметром 60 мм, высотой в четверть длины волны звука в воде для соответствующей частоты колебаний (собственные резонансы стенок цилиндров оказывались при этом расположенными существенно выше по частоте от резонанса четвертьволнового столба воды). Возбуждение резонансного акустического поля на выбранных частотах осуществлялось с помощью вибростенда, на который вертикально закреплялись стаканы-реакторы.

Конструкция реакторов позволяла возбуждать резонансные акустические поля соответствующих частот на низшей моде колебаний с пучностью давления у дна реактора и пучностью колебательной скорости на поверхности воды и контролировать параметры акустического поля, измеряя давление миниатюрным гидрофоном.

Измерения концентрации перекиси водорода производились хемилюминесцентным способом [4].

Пробы воды для измерения концентрации перекиси отбирались полиэтиленовой микропипеткой-дозатором через центр свободной поверхности воды с глубины 1–2 см. В опытах концентрации  $H_2O_2$  в пробах воды из реактора сравнивались со стандартными растворами  $H_2O_2$  в образцах исходной воды. Эти измерения проводились по специально разработанной методике, позволяющей воспроизводимо по отношению к контрольным растворам определять концентрацию  $H_2O_2$  с предельной чувствительностью  $10^{-12}$  М/л [4].

С целью максимальной сохранности образующейся при сонолизе перекиси водорода реакторы были изготовлены из высокочистого кварца. В опытах использовали высокочистую деионизованную воду (полупроводниковой чистоты, класс А, содержание Fe и Cu менее 2 мкг/л). Кроме того, для получения воспроизводимости результатов реакторы обрабатывали в рабочих режимах экспериментов разбавленной серной кислотой для удаления примесей металлов с поверхности реакторов (несколько дней) и деионизованной водой (несколько дней), а перед экспериментами дегазированной деионизованной водой.

Эксперименты по сонолизу проводили с дегазированными в вакууме пробами деионизованной воды, с водой, насыщенной воздухом до парциального равновесия, а также с дегазированными в вакууме растворами сульфата магния ( $MgSO_4$ ) различных концентраций (в том числе и 0,055 М/л – соответствующей содержанию ионов  $Mg^{2+}$  в морской воде), приготовленными на деионизованной воде.

Амплитуды давления звукового поля в пучности давления в опытах имели величину  $p = (0,6 \rightarrow 0,001) \cdot 10^5$  Па, т.е. заведомо меньше кавитационного порога.

Рост газовых пузырьков в опытах наблюдали в реакторе лишь при сонолизе на частоте 1,2 кГц при использовании воды, насыщенной воздухом, при амплитуде давления звукового поля у дна реактора  $p = 0,6$  атм, что было обусловлено постепенной дегазацией воды при звуковом воздействии. В этих случаях пузырьки располагались на 1/3 высоты от дна реактора. В ходе опытов их удаляли отключением звукового поля, когда их размеры достигали примерно 2 мм, т.е. весьма далеко от их резонанса (диаметр резонансного пузырька  $\approx 5,5$  мм).

В результатах опытов со всеми образцами воды и растворов обнаружено образование и накопление перекиси водорода в воде пропорционально времени сонолиза. При этом строго контролировалось отсутствие кавитации. Результаты опытов сведены в табл. 1. (Потери акустической энергии на образование  $H_2O_2$  при слабом акустическом поле (до кавитационного порога):  $f$  (кГц) – частота звука;  $I$  (Вт/см<sup>2</sup>) – интенсивность поля; вода: без газов (БГ), с газами воздуха (В), раствор сульфата магния ( $MgSO_4$  мольная концентрация);  $C_{H_2O_2}$  (М/мл·мин) – начальная скорость генерации  $H_2O_2$  при сонолизе;  $n$  – число опытов;  $\alpha_{хим}$  (дБ/км) – коэффициент затухания звука, определяемый только по образованной  $H_2O_2$ . Температура 19° – 22°, давление атмосферное.)

№ пп.	$f$	$I$	Вода	$C_{H_2O_2}$	$n$	$\alpha_{хим} H_2O_2 \cdot 10^3$	
1	1,1 1,2	0,12 0,1	БГ	$(2,8-4,5) \cdot 10^{-13}$	4	$(0,9-2,5) \cdot 10^{-5}$	
2	1,1 1,2	0,12					
3	1,2	0,12	БГ + $MgSO_4$ (0,05M) море	$(0,6-3) \cdot 10^{-11}$	3	$(0,4-2) \cdot 10^{-3}$	
4	5,2 5,5 5,6	0,03 0,013 0,1	БГ	$(4,5-7) \cdot 10^{-13}$	1	$(1-1,6) \cdot 10^{-4}$	
5a	5,2	0,03		БГ + $MgSO_4$ ( $5 \cdot 10^{-5}$ M)	$(4,2-7,7) \cdot 10^{-13}$	2	$(2-3,8) \cdot 10^{-4}$
					$(1,5-2,5) \cdot 10^{-12}$	2	$(1-1,7) \cdot 10^{-4}$
б			$MgSO_4$ ( $5 \cdot 10^{-4}$ M)	$(6,3-8,3) \cdot 10^{-13}$	2	$(1,4-1,9) \cdot 10^{-4}$	
в			$MgSO_4$ ( $5 \cdot 10^{-3}$ M)	$(8,3-12,5) \cdot 10^{-13}$	2	$(1,4-2,9) \cdot 10^{-4}$	
г		0,003	$MgSO_4$ (0,05 M) море	$(12,5-22) \cdot 10^{-13}$	1	$(2,9-5,1) \cdot 10^{-4}$	
д		$3 \cdot 10^{-5}$	$MgSO_4$ (0,5 M)	$(2,5-5,0) \cdot 10^{-12}$	2	$(5-10) \cdot 10^{-3}$	
6a	5,6	0,013	БГ + $MgSO_4$ ( $1,7 \cdot 10^{-3}$ M)	$(3,3-4,5) \cdot 10^{-13}$	1	$(6-9) \cdot 10^{-2}$	
б			БГ + $MgSO_4$ ( $1,7 \cdot 10^{-2}$ M)	$(1,0-2,2) \cdot 10^{-12}$	3	$(0,5-1,1) \cdot 10^{-3}$	
в			$MgSO_4$ ( $1,7 \cdot 10^{-1}$ M)	$(1,5-4) \cdot 10^{-12}$	3	$(0,8-2) \cdot 10^{-3}$	
7	14,2	$8 \cdot 10^{-6}$	БГ	$(3-7) \cdot 10^{-12}$	3	$(1,7-3,6) \cdot 10^{-3}$	
		$8 \cdot 10^{-5}$		$(1,8-3,3) \cdot 10^{-13}$	3	$(1,4-2,6) \cdot 10^{-3}$	
	15,3	$1,2 \cdot 10^{-3}$	БГ	$(1,1-2,3) \cdot 10^{-12}$	4	$(1-2,2) \cdot 10^{-3}$	
			$(3-7) \cdot 10^{-13}$	3	$(1,7-4) \cdot 10^{-3}$		

В этой таблице измеренные скорости нарастания концентрации  $H_2O_2$  в различных опытах имеют значения внутри отмеченных интервалов значений и более точно авторами определены быть пока не могут.

Авторам известны многочисленные результаты экспериментов по сонолизу воды, проведенные различными исследователями. Как правило, эти эксперименты проводились на сравнительно высоких частотах звука ( $\geq 100$  кГц), с сильными акустическими полями ( $I > 1$  Вт/см<sup>2</sup>). Вода при этом была насыщена теми или иными газами и к тому же во многих случаях представляла раствор еще каких-либо веществ. Авторы включили в рассмотрение лишь данные, когда вода при сонолизе насыщалась воздухом или  $N_2$ - и He-газами, которые, как известно, химически неактивны при обычных температурах и слабо изменяют структуру воды [5]. Результаты анализа сведены в табл. 2. (Потери акустической энергии при сонолизе в кавитационном режиме, определенные по образованной  $H_2O_2$ ;  $f$  (кГц) — частота ультразвука;  $I$  (Вт/см<sup>2</sup>) — эффективная интенсивность звукового поля на поверхности излучателя; характеристики воды; Д — однократно, дважды или трижды дистиллированная; ДИ — деионизованная; В — насыщенная воздухом;  $N_2$ ,  $H_2$  или He — насыщенная азотом, водородом или гелием;  $C_{H_2O_2}$  (М/л мин) — начальная скорость образования перекиси водорода;  $\alpha_{хим}$  (дБ/км) — коэффициент затухания звука, определяемый только образованной  $H_2O_2$ . Опыты проводились при температуре  $19^\circ-25^\circ$ , давление атмосферное).

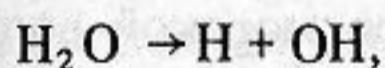
Возможный разброс данных измерений, приведенных в табл. 2, может составлять 20–40% от номинальных значений.

И в том, и в другом случае для оценок авторы пользовались начальными скоростями

№ пп.	$f$	$I$	Вода	$C_{H_2O_2}$	$\alpha_{хим} \cdot 10^3$	Литература
1	380	3	ДВ	$2 \cdot 10^{-6}$	3,0	Beuthe H. Zs. phys. Chem. 1933
2	394	7	ДВ	$8 \cdot 10^{-7}$	8	Соловьева Л.Р. ЖФХ, 1937, вып.1
3	447	6	ДИ В	$2 \cdot 10^{-3}$	21	Mead E. L. Can. J. Chem. 1976, № 1
			N <sub>2</sub>	$4 \cdot 10^{-7}$	0,5	
			H <sub>2</sub>	$9 \cdot 10^{-7}$	1	
4	500	11	ДВ	$5,6 \cdot 10^{-6}$	3,8	Henglein A. Die Naturwissen, 1956
			ДНе или	$1,1 \cdot 10^{-6}$	0,76	
			ДN <sub>2</sub>			
5	625	4	ДВ	$1,4 \cdot 10^{-6}$	2,5	Полоцкий И.Г. ЖОХ, 1938, в. 17, 1947, в. 6
6	800	1	ДВ	$1,5 \cdot 10^{-6}$	10	Маргулис М.А. Основы звукохимии, М., 1984
7	1000	3	ДN <sub>2</sub>	$1,5 \cdot 10^{-6}$	3,3	Маргулис М.А. ЖФХ, 1980, в. 6
8	1000	5,9	Д В	$10^{-5}$	15	Маргулис М.А. ЖФХ, 1976, в. 10
			ДN <sub>2</sub>	$1,2 \cdot 10^{-6}$	1,4	

ми увеличения концентрации  $H_2O_2$  при сонолизе. Это позволяет минимизировать эффект разложения перекиси на металлах, вымываемых из стенок реакторов. Если в измерениях, результаты которых представлены в таблице 2 (мощные звуковые поля, высокие частоты — значительный выход перекиси водорода), этот эффект приводит к уменьшению во времени в 1,5 — 2 раза скорости генерации  $H_2O_2$  через 20–30 мин звуковой экспозиции, то в измерениях авторов (при весьма малых концентрациях генерируемой перекиси водорода) этот эффект: 1) не заметен для дегазированной воды в пределах 15–20 мин; 2) приводит к насыщению скорость генерации  $H_2O_2$ , а в дальнейшем и к уменьшению концентрации через 10–15 мин после начала экспозиции в воде, насыщенной воздухом; 3) приводит к насыщению скорость генерации  $H_2O_2$ , а в дальнейшем и к уменьшению концентрации  $H_2O_2$  через 1–3 мин после начала экспозиции в воде с растворенным  $MgSO_4$  с концентрациями  $\geq 5 \cdot 10^{-3}$  М/л.

Обсуждение результатов. Причиной проведения этих исследований была неудовлетворенность существующими моделями механизма сонолиза воды. До последнего времени [6] диссоциация воды с последующим образованием  $H_2O_2$  и  $H_2$  при сонолизе объяснялась наличием в озвучиваемой воде кавитационных (динамических или стабильных [7]) резонансных пузырей, в паровой или парогазовой полости которых происходит гомогенный распад молекулы воды:



либо под воздействием высоких температур ( $> 5000K$ ) при адиабатическом сжатии пузыря в звуковом поле, либо под действием электрического пробоя парогазового объема при электризации стенок деформированного пузыря или при электризации в процессе распада пузырей с размерами большими, чем резонансные.

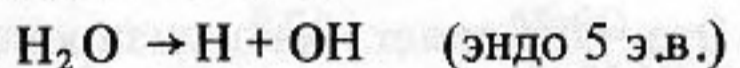
При этом, однако, не учитывается, что вода представляет собой динамически нестабильную полимерную (ассоциированную) систему. При анализе всех доступных литературных экспериментальных данных двое из авторов этого сообщения (Домрачев Г.А. и Селивановский Д.А. [8]) предложили механизм механохимического разложения воды в жидкой фазе, которое может происходить при различных механических воздействиях на воду, учитывающий динамическую полимерную структуру воды по аналогии с механохимией полимеров и их растворов [9].

Для доказательства справедливости таких предположений были поставлены опыты при слабых (докавитационных) полях, в которых отсутствие резонансных или больших, чем резонансные, газовых пузырьков в водной среде гарантировалось как малостью акустического воздействия, так и тем, что в большинстве случаев вода для измерений дегазировалась в вакууме.

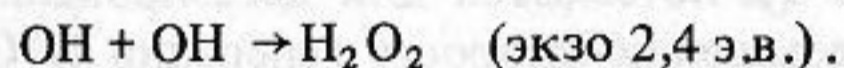
Экспериментальные результаты показывают, что при звуковом воздействии на воду в жидкой фазе (в отсутствие кавитационных явлений) даже при малых интенсивностях звукового поля и низких частотах вода претерпевает механохимическое разложение, сопровождаемое образованием и накоплением перекиси водорода.

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, 2, показывает, что доля потерь акустической энергии, затрачиваемой на сонолиз воды, "меткой" которого является обнаруживаемая перекись водорода, возрастает пропорционально квадрату частоты, и в представлении этих потерь в виде коэффициента затухания имеет (для воды без газов при слабых акустических полях) величины примерно в десять раз меньшие, чем коэффициенты затухания, рассчитанные по вязкости Стокса, или для воды, насыщенной He и N<sub>2</sub> для сильных акустических полей; так же примерно в 10 раз меньше, чем коэффициенты затухания, рассчитанные с использованием объемной вязкости для всех рассмотренных случаев использования воды, насыщенной воздухом, также и для раствора MgSO<sub>4</sub> 0,05 М/л — океаническая концентрация.

Однако следует учесть, что образование перекиси водорода при сонолизе воды, является "меткой" протекания механохимической реакции диссоциации ассоциированных молекул воды, при которой молекулы воды диссоциируют на атомарный водород и гидроксил-радикал:



Их рекомбинация экзотермична и осуществляется различными способами вновь до воды, молекулярного водорода и перекиси водорода [10]:



Скорость диффузии атомов водорода более таковой для OH-радикалов (для температуры 20°) приблизительно в 10 раз [11]. Можно принять, что скорости рекомбинации до H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> соотносятся как 100:10:1.

Здесь уместно напомнить, что сдвиговые вязкости в водах с растворенными газами или даже океанической воды довольно слабо различаются по величинам. Если принять сдвиговую вязкость пресной воды, лишенной газов, за 1, то при температуре 20° вязкость воды, насыщенной He, составит 1,0 + 0,01, относительная вязкость воды, насыщенной воздухом, 1,02 ± 0,02, и, наконец, вязкость модели океанической воды, т.е. раствора, содержащего 0,055 М/л Mg<sup>2+</sup> 1,08 ± 0,02 (все измерения проделаны авторами по скорости истечения воды из капилляра; последние, касающиеся морской воды, хорошо соответствуют известным данным [14]). Интересно отметить, что соотношения разниц значений относительных величин вязкости достаточно хорошо совпадает с соответствующим увеличением коэффициентов затухания звука.

Совместное рассмотрение результатов (рис. 1) акустического затухания и потерь энергии при сонолизе (как в докавитационном, так и в кавитационном режимах при этом для удобства на рис. 1 оцененные по результатам опыта величины α<sub>хим</sub> увеличены в 10<sup>9</sup> раз) позволяет предположить, что затухание звука в воде сопровождается механохимическим процессом, включающим акты диссоциации молекул воды (потеря акустической энергии) и рекомбинацию осколков деления H + OH (выделение энергии в виде тепла и света — сонолюминесценция [2]), причем некоторая часть гидроксил-радикалов рекомбинирует до перекиси водорода. Можно говорить о зависимости эффективности этого процесса в звуковом поле от степени структурированности воды из-за чаличия в ней растворенных газов воздуха, прежде всего кислорода, и сульфата магния (ионы магния обладают наибольшей структурирующей способностью по отношению к воде из всех основных катионов морской воды [5]). В описываемых опытах структуры в воде изменялись от рыхлых ассоциатов (дегазированная высокочистая вода или вода, насыщенная He и N<sub>2</sub>) к более жестким гидратам и соединениям включения газов в структуру воды (вода, насыщенная воздухом), до наиболее жестких струк-

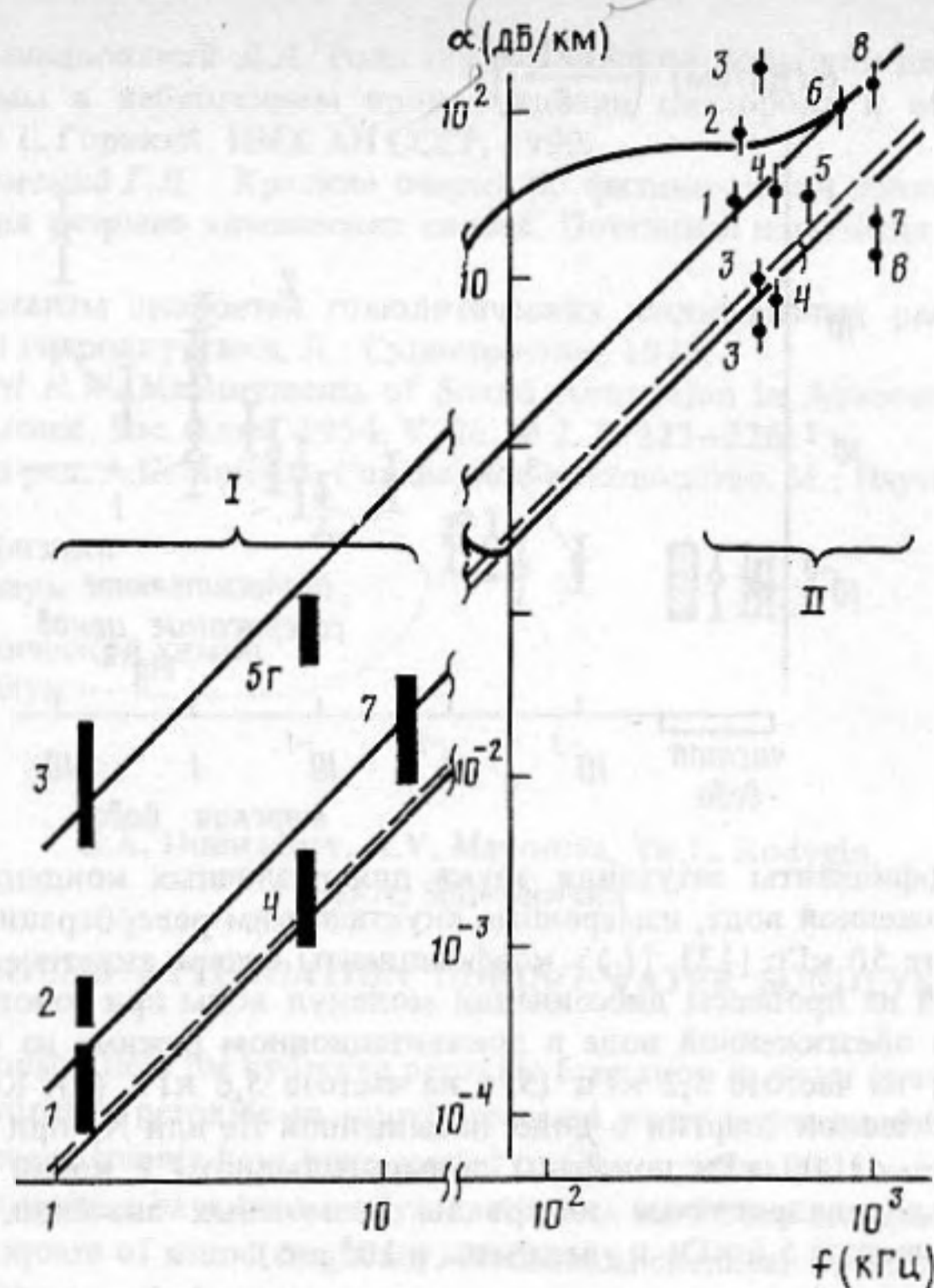


Рис. 1. Коэффициенты затухания звука, измеренные в морской, пресной и обезгаженной пресной воде [13], показаны сплошными линиями, пунктиром показан коэффициент затухания, вычисленный Рэлеем по сдвиговой вязкости. Вертикальными линиями нанесены интервалы возможных значений коэффициентов потерь акустической энергии, потребляемой на процессы диссоциации молекул воды при сонолизе: I — данные, соответствующие табл. 1, II — данные, соответствующие табл. 2 (результаты опытов увеличены в  $10^3$  раз, см. табл. 1, 2). Ось частот имеет разрыв для интервала частот 15 кГц—50 кГц

тур из гидратных сфер ионов магния (растворы  $MgSO_4$ ). Соответственно этому с увеличением жесткости структуры увеличивалась эффективность диссоциации воды, а с ней и скорость образования перекиси водорода — "метки" прошедшего распада воды.

Аналогичные явления хорошо известны в механохимии полимеров: чем больше межмолекулярные взаимодействия между макромолекулами, или чем более пространственно структурирован полимер, тем больше выход механохимических превращений макромолекул при сдвиговых деформациях, сопровождаемых диссоциацией химических связей [9].

Справедливость такого рода соображений хорошо подтверждается совместным представлением результатов Леонарда [13], измерившего изменение величины затухания в воде в зависимости от концентрации  $Mg^+$  (использованы данные Леонарда для частоты звука  $< 60$  кГц, т.е. ниже границы релаксации), и измерений авторов, проведенных также на растворах  $MgSO_4$  с различными концентрациями (рис. 2). Все данные совместно представлены в виде коэффициентов затухания, пересчитанных к одной из частот (в данном случае была выбрана частота 5,6 кГц), и потери энергии на образование измеренного количества перекиси водорода в измерениях авторов, как и для представления на рис. 1, увеличены в  $10^3$  раз.

Уточнение полученных величин потерь акустической энергии в воде на механохимические преобразования, а соответственно и доли традиционных путей диссипации акустической энергии (вязкое трение, теплопроводность) прежде всего зависит от уточнения величин констант реакций рекомбинации H и OH до  $H_2O$  и  $H_2O_2$ . В настоящее время

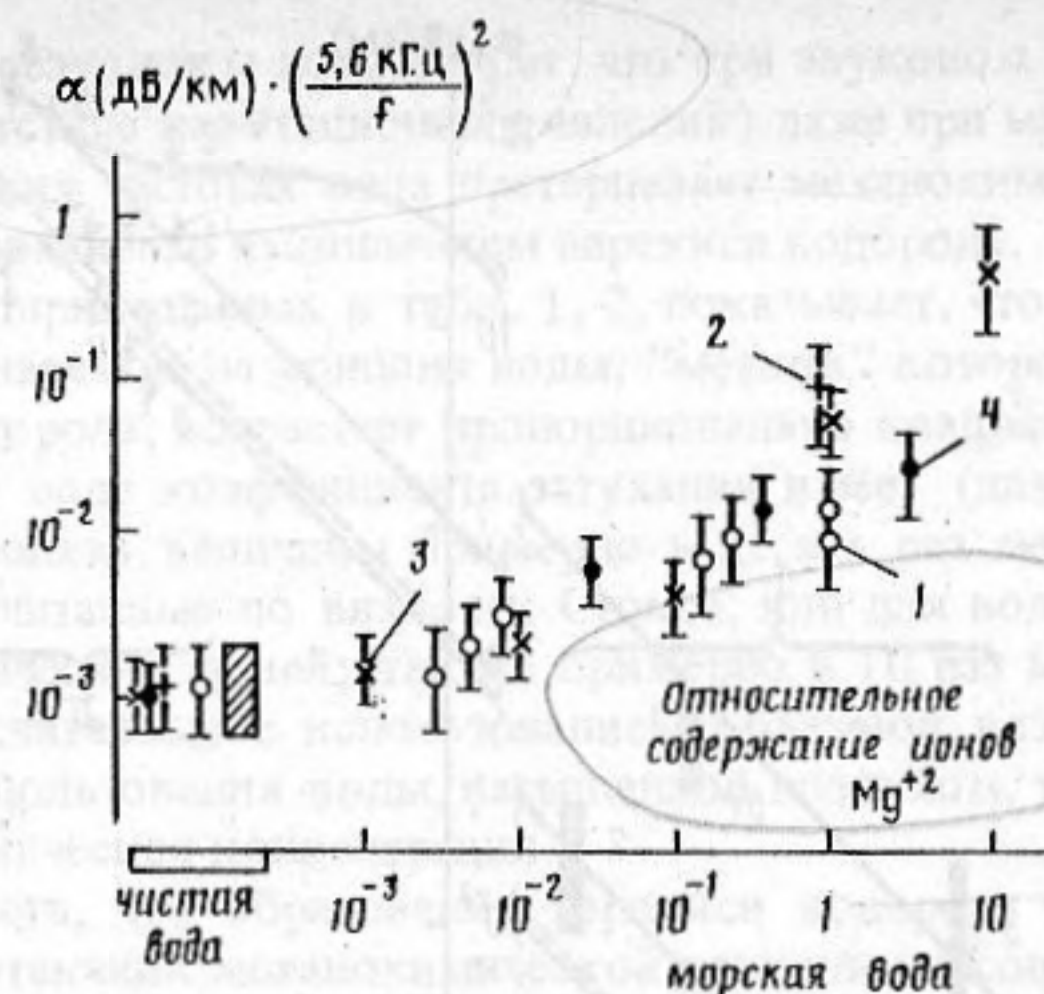


Рис. 2. Коэффициенты затухания звука для различных концентраций ионов  $Mg^{2+}$  в обезгаженной воде, измеренные акустическим реверберационным способом на частоте 50 кГц [13] (1); коэффициенты потерь акустической энергии, потребляемой на процессы диссоциации молекул воды при сонолизе в растворах  $MgSO_4$  в обезгаженной воде в докавитационном режиме на частоте звука 1,2 кГц (2); на частоте 5,2 кГц (3); на частоте 5,6 кГц (4). Коэффициенты потерь акустической энергии в воде, насыщенной He или  $N_2$  при кавитации на частотах 350 – 1000 кГц показаны прямоугольником с косой штриховкой. Указаны среднеквадратичные интервалы возможных значений. (Все данные приведены к частоте 5,6 кГц и увеличены в  $10^3$  раз)

эти константы определены не лучше, чем  $\pm 500\%$ , и мы использовали их средние значения. Важно также определить температурные зависимости этих констант — это позволило бы привлечь к аналогичному рассмотрению имеющиеся примерно такие же по объему данные других исследователей, проводивших измерение сонолиза при температуре  $40 - 60^\circ$ . Решение этих задач — насущная проблема описываемых исследований.

В заключение следует заметить, что механохимическое разложение воды в жидкой фазе вряд ли имеет заметный энергетический порог, в отличие от порога кавитации, и, по-видимому, сопровождает многие природные механические движения на Земле.

И наконец, явление сонолиза воды предполагает возможность проявления нелинейных свойств воды при распространении звука в части, связанной с нелинейностью уравнения состояния. При распространении звука области сжатия и разрежения различаются интенсивностью протекания механохимических реакций: диссоциация более вероятна в областях разрежения, рекомбинация — в областях сжатия жидкой фазы воды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бергман Л.: Ультразвук, М.: ИИЛ, 1956.
2. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция, М.: Химия, 1986.
3. Stass W.H., Spuriock L.A. Chemistry of Ultrasound, Part IV // J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1975. № 1 (17). P. 1675–1679.
4. Домрачев Г.А., Родыгин Ю.Л., Селивановский Д.А. Усовершенствованная методика хемолуминесцентного определения малых концентраций перекиси водорода // Высокочистые вещества, 1991. № 5. С. 187–189.
5. Физическая акустика / Под ред. У. Мэсона. Т. 2. Ч.А. М.: Мир, 1968.
6. Margulis M.A. The Nature of Sonochemical Reactions and Sonoluminescence // Advan. Sonochemistry. 1990. V. 1. P. 39–80.
7. Saksena T.K., Nyborg M.L. Sonoluminescence from stable Cavitation // J. Chem. Phys. 1970. V. 55. P. 1722–1734.

8. Домрачев Г.А., Селивановский Д.А. Роль звука и жидкой воды как динамически нестабильной полимерной системы в небиогенном происхождении кислорода и возникновении жизни на Земле. Препринт № 1. Горький: ИМХ АН СССР, 1990.
9. Каргин В.А., Слонимский Г.Л. Краткие очерки по физико-химии полимеров. М.: Химия, 1967.
10. Гурвич Л.В. Энергия разрыва химических связей. Потенциал ионизации и электронное сродство. М.: Наука, 1974.
11. Денисов Е.Т. Константы скоростей гомолитических жидкофазных реакций. М.: Наука, 1971.
12. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978.
13. Wilson O.B., Leonard R.W. Measurements of Sound Absorption in Aqueous Salt Solution by a Resonator Method // J. Acoust. Soc. Amer. 1954. V. 26. № 2. P. 223-226.
14. Морская вода / Под ред. А.С. Моница. Справочное руководство. М.: Наука, 1979.

Институт прикладной физики  
Российской академии наук

Поступила в редакцию  
18.05.92

Институт металлоорганической химии  
Российской академии наук

G.A. Domrachev, A.V. Mayorova, Yu.L. Rodygin,  
D.A. Selivanovskii

### SOUND ATTENUATION DURING WATER SONOLYSIS

The energy lost by acoustic field for hydrogen peroxide formation in water (water sonolysis) is calculated. The concentration of hydrogen peroxide in sound-processed water is measured by the chemiluminescence method. The sonolysis measurements have been carried out for a precavitation regime. The results of other authors for the cavitation regime have been analysed. All data have been arranged into a sequence of energies proportional to the square of sound frequency. Mechanical-chemical transformation losses have turned out to be comparable with acoustic losses.