

СВЧ-диагностика влияния физических воздействий на электромагнитные характеристики воды

А. А. Барзов¹, А. Л. Галиновский¹, Н. Н. Сысоев¹, А. Э. Постельга²,
А. Д. Усанов^{2,a}, Д. А. Усанов², А. В. Хахалин¹

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Центр гидрофизических исследований. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

²Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, кафедра физики твердого тела. Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д. 83.

E-mail: ^ausanovda@info.sgu.ru

Статья поступила 19.01.2012, подписана в печать 16.02.2012.

Количественно определены изменения характеристик воды, предварительно подверженной ударным нагрузкам, при воздействии на нее переменного магнитного поля, а именно диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, с использованием СВЧ-системы, допускающей решение обратной задачи. Приведены результаты измерений оптического спектра воды в режиме «на пропускание», подверженной ударной нагрузке, в сравнении с оптическим спектром дистиллированной воды.

Ключевые слова: ударные нагрузки, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, вода, магнитное поле.

УДК: 537.636:537.226.86. PACS: 41.20.Jb.

Введение

Известно, что в результате энергетического воздействия на различные жидкости, в частности воду, происходит изменение их характеристик, связанных с молекулярной структурой исследуемой гидросреды. Представляет интерес изучение изменений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, которые интегрально позволяют оценить вариативность электромагнитных и иных свойств изучаемого объекта, подвергнутого энергетическому воздействию той или иной физической природы.

В связи с этим в настоящей работе исследуется влияние на данные характеристики воды двух разнородных видов физического воздействия:

1) ударного взаимодействия сверхскоростной ультраструй воды, имеющей плотность потока мощности ~ 1 МВт/мм², с твердотельной (алмазной) мишенью;

2) относительно энергетически слабого — переменного низкочастотного (3–10 Гц) магнитного поля.

Кроме этого рассмотрено изменение диэлектрических характеристик воды, подвергнутой ультраструйному воздействию, к последующему влиянию переменного магнитного поля.

Ранее было установлено, что первый гидромеханический тип воздействия — ультраструйная обработка воды существенно изменяет ее физико-химические, биологические и другие свойства [1, 2].

Результаты второго, магнитного воздействия на свойства воды рассматривались в работах [3–5]. В частности сообщалось об обнаружении влияния переменного низкочастотного (3–10 Гц) магнитного поля на частоту сердечных сокращений дафнии — водяного рачка, используемого в качестве биоиндикатора. Было сделано предположение, что это связано с влиянием переменного магнитного поля на физические характеристики воды.

В качестве эффективного способа определения изменений характеристик воды при данных типах физического воздействия на нее использовался волноводный метод измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. В работе [6] в результате использования волноводного метода измерений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь было показано, что воздействие переменного низкочастотного магнитного поля приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды, при этом изменение свойств воды до некоторого устойчивого состояния происходит в течение определенного времени после начала воздействия магнитного поля. После прекращения воздействия магнитного поля эти величины через некоторый период времени возвращались в исходное состояние.

Целью настоящей работы явилось количественное определение изменений диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды, предварительно подверженной ультраструйным ударным нагрузкам, а также воздействию на нее переменного магнитного поля.

1. Теоретический анализ комплексного коэффициента отражения

При теоретическом анализе рассматривалось распространение $TE_{10}(H_{10})$ волны в волноводе и ее отражение от слоя воды III, ограниченного диэлектрической вставкой II (рис. 1). Измеряемая структура состояла из слоя диэлектрика толщиной L с диэлектрической проницаемостью ε_d и полубесконечного слоя воды с диэлектрической проницаемостью ε_w .

Выражение для комплексного коэффициента отражения электромагнитной волны от полубесконечного слоя воды в волноводе, ограниченного диэлектрической

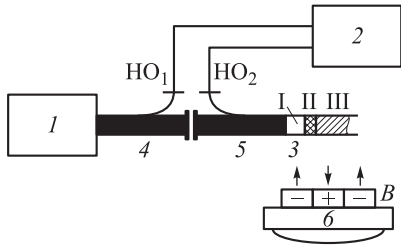


Рис. 1. Схема установки: 1 — генератор качающейся частоты Р2-65; 2 — индикатор Я2Р-67 КСВН и ослабления; 3 — измеряемая структура; 4, 5 — направленные ответвители; 6 — источник переменного магнитного поля; I — незаполненная область волновода, II — диэлектрическая вставка толщиной L , III — полубесконечный слой воды

вставкой, может быть представлено в виде [5]

$$R^* = \frac{\exp(2\gamma_d L)(\gamma_d - \gamma_0)(\gamma + \gamma_d) + (\gamma_0 + \gamma_d)(\gamma - \gamma_d)}{-\exp(2\gamma_d L)(\gamma_d + \gamma)(\gamma_0 + \gamma_d) + (\gamma_0 - \gamma_d)(\gamma - \gamma_d)}, \quad (1)$$

где $\gamma = \sqrt{\frac{\pi^2}{a^2} - \omega^2 \varepsilon_w^* \varepsilon_0 \mu_0}$ — постоянная распространения электромагнитной волны в волноводе, заполненном водой, $\varepsilon_w^* = \varepsilon_w(1 - j \operatorname{tg} \delta)$ — комплексная диэлектрическая постоянная, ε_w — диэлектрическая проницаемость, $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь воды, γ_0 — постоянная распространения в пустой части волновода, γ_d — постоянная распространения волны в отрезке волновода с диэлектриком, a — размер широкой стенки волновода, ε_0 и μ_0 — электрическая и магнитная проницаемости вакуума.

2. Методика проведения СВЧ-диагностирования

Эксперимент проводился на установке, схема которой представлена на рис. 1, в диапазоне частот от 26 до 37.5 ГГц.

В качестве источника переменного магнитного поля на частотах от 3 до 20 Гц источником поля использовался вращающийся диск диаметром 25 см, на котором радиально были прикреплены чередующиеся по полярности постоянные магниты с осью намагничивания, перпендикулярной плоскости диска. Амплитуда переменного магнитного поля B внутри камеры вблизи ее дна составляла 30 мТл.

Возможность теоретического описания зависимости коэффициента отражения R_{theor} от частоты СВЧ-излучения f и измерения этой зависимости позволяет решить так называемую обратную задачу: определить параметры воды по этим зависимостям.

3. Решение обратной задачи по результатам измерений

Для решения обратной задачи была измерена зависимость коэффициента отражения $R(f)$ от частоты СВЧ-излучения f и рассчитывалась сумма квадратов отклонений экспериментальных значений коэффициента отражения $R_{\text{exp}}(f)$ от теоретических $R_{\text{theor}}(f)$ [6]:

$$S = \sum_{i=1}^n [R_{\text{theor}}(f_i, \varepsilon_w, \operatorname{tg} \delta) - R_{\text{exp}}(f_i)]^2, \quad (2)$$

где ε_w , а $\operatorname{tg} \delta$ — искомые параметры обратной задачи.

Решение обратной задачи состоит в том, чтобы найти такие значения искомых параметров, при которых сумма S будет иметь наименьшее значение. В точке минимума суммы S ее частные производные равны нулю. После дифференцирования S по параметрам ε_w и $\operatorname{tg} \delta$ и приравнивания к нулю частных производных $\partial S / \partial \varepsilon_w$ и $\partial S / \partial \operatorname{tg} \delta$ в точке минимума получаем систему двух уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial \varepsilon_w} = 2 \sum_{i=1}^n [R_{\text{theor}}(f_i, \varepsilon_w, \operatorname{tg} \delta) - R_{\text{exp}}(f_i)] \times \\ \quad \times \frac{\partial R_{\text{theor}}(f_i, \varepsilon_w, \operatorname{tg} \delta)}{\partial \varepsilon_w} = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial \operatorname{tg} \delta} = 2 \sum_{i=1}^n [R_{\text{theor}}(f_i, \varepsilon_w, \operatorname{tg} \delta) - R_{\text{exp}}(f_i)] \times \\ \quad \times \frac{\partial R_{\text{theor}}(f_i, \varepsilon_w, \operatorname{tg} \delta)}{\partial \operatorname{tg} \delta} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $R_{\text{theor}}(f_i, \varepsilon_w, \operatorname{tg} \delta)$ находится из выражения (1). Из решения системы уравнений (3) определяются две искомые величины ε_w и $\operatorname{tg} \delta$.

4. Результаты исследований и их обсуждение

В расчетах задавались следующие параметры диэлектрической вставки: толщина 20 мм, диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2.1$. Диэлектрик именно с такими параметрами использовался в эксперименте.

На рис. 2 представлены результаты определения по описанной выше методике зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь контрольного и опытного образцов воды от времени воздействия переменного магнитного поля частотой 10 Гц и амплитудой 30 мТл. Из приведенных на этом рисунке результатов видно, что с момента включения поля ($t=0$) с указанными выше параметрами в течение 70 мин наблюдалось уменьшение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды. Затем изменения прекращались, и в течение 20 мин наблюдений указанные величины оставались постоянными. При последующем выключении магнитного поля, которое производилось через 90 мин, наблюдалось увеличение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды и их возврат к прежнему значению в течение примерно 80 мин. При указанных параметрах переменного магнитного поля максимальное обратимое относительное изменение диэлектрической проницаемости контрольного образца воды составило около 0.31%, а относительное изменение тангенса угла диэлектрических потерь — около 0.16%.

На рис. 2 также представлены результаты определения по описанной выше методике зависимости диэлектрической проницаемости воды, подверженной ударной нагрузке, при рабочем давлении величины $P = 300$ МПа, в переменном магнитном поле с частотой $\Omega = 10$ Гц и амплитудой $B = 30$ мТл (сплошная кривая) и тангенса угла диэлектрических потерь воды в переменном магнитном поле с частотой $\Omega = 6$ Гц и амплитудой $B = 30$ мТл (пунктирная кривая) от времени воздействия магнитного поля.

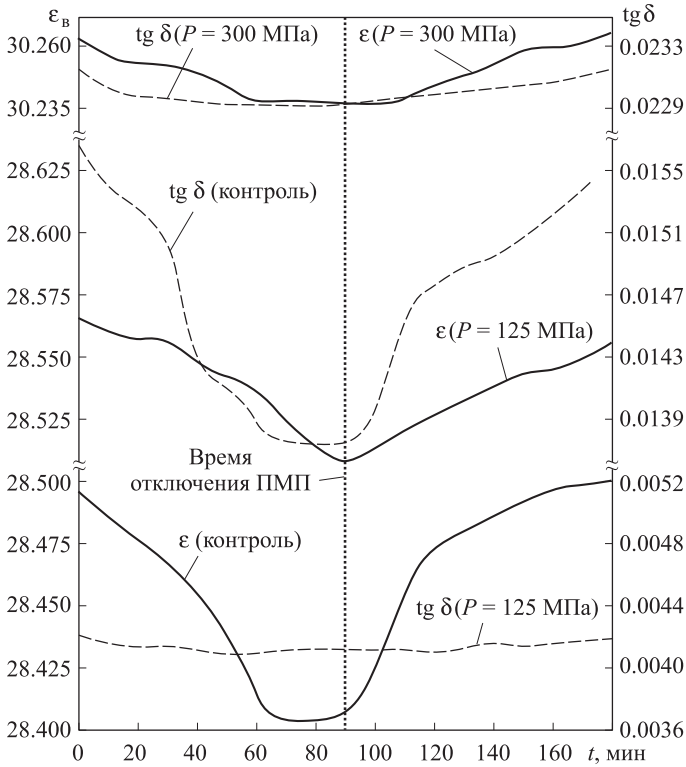


Рис. 2. Зависимость диэлектрической проницаемости контрольного образца воды; воды, подверженной ударной нагрузке, величиной $P = 300$ МПа (3000 атм); воды, подверженной ударной нагрузке, величиной $P = 125$ МПа (1250 атм) в переменном магнитном поле частотой $\Omega = 10$ Гц и амплитудой $B = 30$ мТл (сплошная кривая) и тангенса угла диэлектрических потерь воды (пунктирная кривая) от времени воздействия магнитного поля

нагрузке, величиной $P = 125$ МПа, в переменном магнитном поле с частотой $\Omega = 12$ Гц и амплитудой $B = 30$ мТл (сплошная кривая) и тангенса угла диэлектрических потерь воды (пунктирная кривая) от времени воздействия магнитного поля.

Из приведенных результатов видно, что с момента включения поля ($t = 0$) с указанными выше параметрами в течение 60 мин наблюдалось уменьшение ϵ и $\text{tg } \delta$ воды.

Следует отметить, что ϵ воды, подверженной ударной нагрузке $P = 125$ МПа, больше ϵ контрольного образца воды на величину 0.0652; а ϵ воды, подверженной ударной нагрузке $P = 300$ МПа, больше ϵ контрольного образца воды на величину 1.77; $\text{tg } \delta$ воды, подверженной ударной нагрузке $P = 125$ МПа, меньше $\text{tg } \delta$ контрольного образца воды на величину 0.011, а $\text{tg } \delta$ воды, подверженной ударной нагрузке $P = 300$ МПа, больше $\text{tg } \delta$ контрольного образца воды на величину 0.008.

При отключении ПМП значение ϵ и $\text{tg } \delta$ контрольного образца воды возвращается к исходному значению в течение 60 мин, тогда как значение ϵ воды, подверженной ударной нагрузке $P = 125$ МПа, при отключении ПМП приходит к значению, меньшему исходного на 0.008; а значение ϵ воды, подверженной ударной нагрузке $P = 300$ МПа, становится больше исходного на 0.0025. Значение же $\text{tg } \delta$ воды, подверженной ударной нагрузке $P = 125$ МПа, после отключения переменного магнитного поля (ПМП) через 60 мин становится меньше исходного на 0.0003; а для воды, подверженной ударной нагрузке $P = 300$ МПа, возвращается к исходному значению.

На рис. 3 представлены зависимости величины изменения диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) воды от частоты воздействия переменного магнитного с амплитудой 30 мТл и при времени воздействия 60 мин для контрольного образца воды, а также для образцов, подверженных ударным нагрузкам $P = 300$ МПа и $P = 125$ МПа.

Из результатов, приведенных на рис. 3 видно, что изменение ϵ при воздействии переменным магнитным полем на воду, подверженную ударной нагрузке $P = 125$ МПа, в среднем меньше на 0.042; а для воды, подверженную ударной нагрузке $P = 300$ МПа, в среднем меньше на величину 0.044, чем аналогичное изменение для контрольного образца воды. Изменение же $\text{tg } \delta$ при воздействии переменным магнитным полем на воду, подверженную ударной нагрузке $P = 125$ МПа, в среднем меньше на 0.00072; а для воды, подверженной ударной нагрузке $P = 300$ МПа, в среднем меньше на величину 0.00079, чем аналогичное изменение для контрольного образца воды.

Кроме того, наблюдается частотный сдвиг на 2 Гц максимума изменения ϵ и $\text{tg } \delta$ воды в сторону больших частот переменного магнитного поля для воды, подверженной ударной нагрузке $P = 125$ МПа, и частотный сдвиг на 4 Гц максимума изменения $\text{tg } \delta$ воды в сторону меньших частот переменного магнитного поля для воды, подверженной нагрузке $P = 300$ МПа.

На рис. 4 представлен оптический спектр на пропускание (измеренный с помощью спектрофотометра «Shimadzu-MRS-5000», Япония) для различных образ-

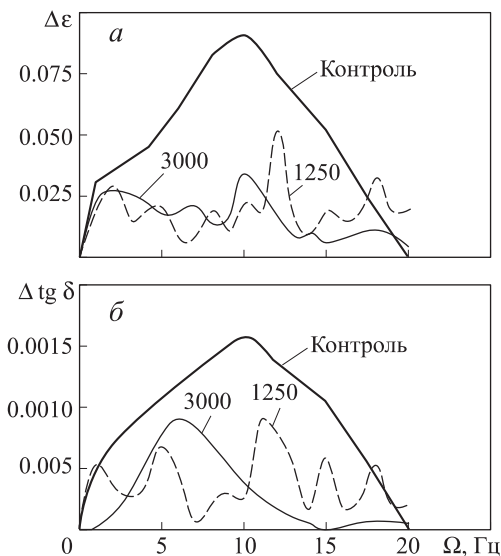


Рис. 3. Зависимости величин изменения диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) воды от частоты воздействия переменного магнитного с амплитудой 30 мТл и при времени воздействия 60 мин

На рис. 3 представлены результаты определения по описанной выше методике зависимости диэлектрической проницаемости воды, подверженной ударной

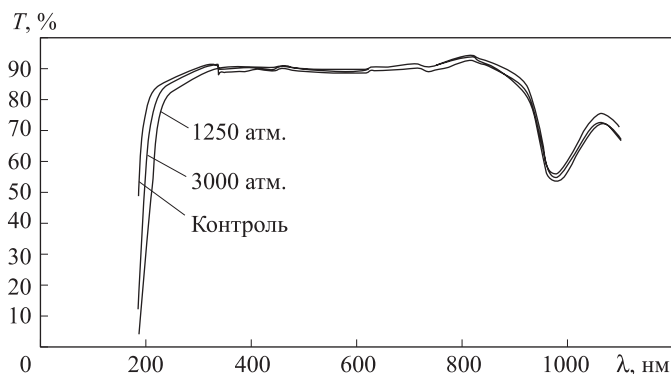


Рис. 4. Оптический спектр на пропускание для различных образцов воды: контрольного и подверженной ударным нагрузкам $P = 125$ МПа (1250 атм) и $P = 300$ МПа (3000 атм)

цов воды: контрольного образца и подверженной ударным нагрузкам $P = 125$ МПа и $P = 300$ МПа.

Из приведенных на этом рисунке результатов следует, что низкочастотный край полосы пропускания воды, подверженной ударным нагрузкам, сдвинут в длинноволновую область. Это свидетельствует о происшедших в результате этих нагрузок структурных изменениях воды, что подтверждается и результатами измерения ее диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Заключение

По результатам выполненных исследований можно сделать некоторые выводы и сформулировать предварительные обобщения.

1. Аппарат СВЧ-диагностирования позволяет количественно оценивать эффекты влияния различных по своей энергетике и природе физических воздействий на

структурно-молекулярные изменения воды. Эти изменения достоверно фиксируются путем изменения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь воды.

2. Изменения электрофизических параметров воды, фиксируемые путем СВЧ-диагностирования, по видимому, связаны в первую очередь с соответствующими изменениями ее молекулярно-дипольной и кластерной структуры в результате как энергетически сильного ультраструйного ударно-динамического воздействия с плотностью потока мощностью ~ 1 МВт/мм², так и относительно слабого энергетического воздействия переменным магнитным полем. В последнем случае имеет место достаточно выраженный кинетический (временной) характер этих изменений, в частности восстановление с течением времени электрофизических параметров воды.

Список литературы

1. Барзов А.А., Королев А.Ф., Пузаков В.С. и др. Струйная интенсификация функциональной активности жидкостей. Физическая гидродинамика. Препринт физ. ф-та МГУ. 2004. № 7.
2. Балашов О.Е., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Сысоев Н.Н. Физико-технологический анализ функциональных возможностей ультраструйного микросуспензирования жидкостей. Физическая гидродинамика. Препринт физ. ф-та МГУ. 2010. № 4.
3. Усанов Д.А., Шишкин Г.Г., Скрипаль А.В., Усанов А.Д. // Биомед. радиоэлектроника. 2001. № 8. С. 57.
4. Усанов Д.А., Шишкин Г.Г., Скрипаль А.В., Усанов А.Д. // Биомед. технологии и радиоэлектроника. 2003. № 3. С. 59.
5. Усанов Д.А., Шишкин Г.Г., Скрипаль А.В. и др. // Петерб. журн. электроники. 2002. № 4. С. 38.
6. Усанов Д.А., Постельга А.Э., Усанов А.Д. // Физ. волновых процессов и радиотехн. системы. 2009. 12, № 1. С. 34.

Microwave diagnostics of physical effects upon water electromagnetic characteristics

A. A. Barzov¹, A. L. Galynovskiy¹, N. N. Sysoev¹, A. E. Postelga², A. D. Usanov^{2,a}, D. A. Usanov², A. V. Khakhalin¹

¹Research Center of Hydrophysics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

²N. G. Chernyshevsky Saratov State University, Saratov 410012, Russia.

E-mail: ^ausanovda@info.sgu.ru.

Characteristics changes of water previously exposed to impact load were determined quantitatively under the influence of alternating magnetic field, namely dielectric conductivity and dielectric loss tangent, using microwave system which permits inverse problem solution. The results of water exposed to the impact load optical spectrum measurements in the transfective mode are set in comparison with distilled water optical spectrum.

Keywords: impact loads, magnetic field, permittivity, dielectric loss tangent, water.

PACS: 41.20.Jb.

Received 19 January 2011.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2012).

Сведения об авторах

1. Барзов Александр Александрович — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (499) 263-65-96, e-mail: cm12@sm.bmstu.ru.
2. Галиновский Андрей Леонидович — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 263-62-12, e-mail: galcomputer@mail.ru.
3. Сысоев Николай Николаевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, декан; тел.: (495) 939-10-97, e-mail: nn.sysoev@physics.msu.ru.
4. Постельга Александр Эдуардович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (845-2) 51-14-30, e-mail: idea@olipi.ru.
5. Усанов Александр Дмитриевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (845-2) 51-14-30, e-mail: aka_norton@mail.ru.
6. Усанов Дмитрий Александрович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, академик МАН ВШ; тел.: (845-2) 51-14-30, e-mail: usanovda@info.sgu.ru.
7. Хахалин Андрей Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-40-34, e-mail: avkhakhalin@mail.ru.