

УДК 534.286.2

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АКУСТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ВО ВЗВЕСЯХ С ПОМОЩЬЮ ОБРАЩЕННЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

© 2013 г. Н. В. Смагин, Л. М. Крутянский, А. П. Брысев

Европейская ассоциированная лаборатория по нелинейной магнитоакустике конденсированных сред (ЕАЛНМА)
 Научный центр волновых исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН,

119991 Москва, ул. Вавилова 38

E-mail: nikolay.smagin@gmail.com

Поступила в редакцию 05.10.2012 г.

Выполнены эксперименты по измерению коэффициента акустического поглощения в тестовых объектах, содержащих случайно распределенные по объему твердые микрочастицы. При этом использовались два метода: стандартный эхо-импульсный метод введения образца и его модификация с применением эффекта обращения волнового фронта ультразвука. Тест-объекты были изготовлены из желатина, а размеры частиц были подобраны таким образом, чтобы провести измерения как в длинноволновом, так и в средневолновом режимах рассеяния зондирующего пучка. Показано, что в первом режиме, когда присутствие частиц приводит к дополнительным вязкостным и температурным потерям, оба сравниваемых метода дают одинаковые результаты. Во втором режиме, когда основным механизмом дополнительных потерь является упругое рассеяние, эффект обращения волнового фронта позволяет практически полностью восстановить рассеянное поле и за счет этого получить более достоверную верхнюю оценку коэффициента поглощения ультразвука в тестовых объектах.

Ключевые слова: затухание звука, обращение волнового фронта, взвеси, рассеяние звука.

DOI: 10.7868/S0320791913020123

ВВЕДЕНИЕ

Измерения коэффициента акустического поглощения играют важную роль в медицинских и технических приложениях ультразвука. Данная физическая величина несет существенную информацию об исследуемом объекте, ее необходимо учитывать при построении акустических изображений, оценке воздействия ультразвука в биомедицине и диагностике некоторых заболеваний [1].

Нередко объекты исследования обладают неправильной геометрической формой и акустически неоднородной структурой. При использовании фазочувствительных датчиков, например пьезопреобразователей, подобные особенности могут приводить к так называемому эффекту фазовой компенсации заряда на поверхности датчика и существенной переоценке величины поглощения, которая может достигать сотен процентов [2, 3]. Фазочувствительные датчики, такие как радиометры, позволяют получать более достоверные данные [4]. Однако из-за сложности их практического применения большинство современных справочных данных по поглощению ультразвука в биологических тканях получено при помощи именно фазочувствительных пьезопреобразователей. Несмотря на невосприимчивость к эффекту фазовой компенсации, фазочувствительные

датчики, так же как и пьезопреобразователи, чувствительны к рассеянию зондирующих пучков на включениях в виде воздушных пузырьков или других контрастных частиц [1, 5], следствием чего также является завышение получаемых значений акустического поглощения среды.

Сравнительно недавно было показано, что применение эффекта обращения волнового фронта (ОВФ) ультразвука позволяет проводить фазонечувствительные измерения коэффициента акустического поглощения в образцах биологических тканей [6], а также получать более достоверную оценку поглощения в средах с включениями газовых пузырьков [7]. Сходный принцип уточненных измерений акустического поглощения был предложен в [8], однако сравнение получаемых результатов с априорно известными величинами затухания в эталонных средах в данной работе не проводилось, что делает невозможным их сопоставление с результатами других методов.

В настоящей работе представлены результаты дальнейших исследований предложенной методики измерения с ОВФ применительно к взвесям твердых частиц в гелеобразной среде при различных режимах рассеяния зондирующего пучка и различных объемных концентрациях дисперсной фазы.

МЕТОДИКА, ОБРАЗЦЫ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальная методика была аналогична описанной в работе [6]. Измерения коэффициента акустического поглощения были реализованы по принципу импульсного метода введения образца, применяемого в схеме с отражением [9], причем двумя способами: стандартным и с использованием ОВФ. Схема эксперимента изображена на рис. 1. В качестве эталонной жидкости использовалась дистиллированная вода. Образец вносился в воду между плоским ультразвуковым преобразователем диаметром 25 мм и зеркально отражающей звук квадратной металлической пластиной с размерами 100 × 100 × 10 мм, установленной нормально к акустическому пучку на расстоянии 70 мм от преобразователя. Расстояние от образца до пластины составляло 10 мм. На преобразователь подавались возбуждающие импульсы с несущей частотой 5 МГц, длительностью 5 мкс и амплитудой 4 В. Частота 5 МГц выбиралась только из удобства конкретной экспериментальной реализации. После излучения импульса преобразователь работал на прием отраженного от пластины сигнала.

Помещаемый в акустический тракт образец вносит потери, обусловленные затуханием звука в материале, а также отражением на границах. Зная заранее параметры эталонной жидкости, а также такие характеристики образца, как скорость звука и плотность, и считая волну плоской, можно рассчитать затухание звука в образце α_s по измеренным амплитудам сигнала U_s с образцом и U_w без него:

$$\alpha_s = \frac{1}{2L} \ln \left[\frac{U_w T^2}{U_s} \right] + \alpha_w, \quad (1)$$

где L — толщина образца, α_w — поглощение звука в воде, а T — коэффициент нормального прохождения плоской волны через две границы раздела образец–вода, $T = 4Z_w Z_s / (Z_w + Z_s)^2$, $Z_i = \rho_i c_i$ — акустическое сопротивление заданной среды i , индексы w и s — для воды и образца соответственно. Метод с использованием отраженного сигнала мы будем называть стандартным.

При измерениях с помощью обращенных волн звукоотражающая пластина замещалась параметрической системой ОВФ. Принцип ее работы описан, например, в [10]. Входная апертура системы имела диаметр 36 мм. Значение затухания рассчитывалось при этом по приведенной выше формуле по соотношению принятых амплитуд обращенной волны с образцом и без него. Оценка погрешности измерений затухания для обоих методов составила ±10%.

При рассмотрении распространения звука в неоднородных дисперсных средах предполагается аддитивность всех видов потерь акустической

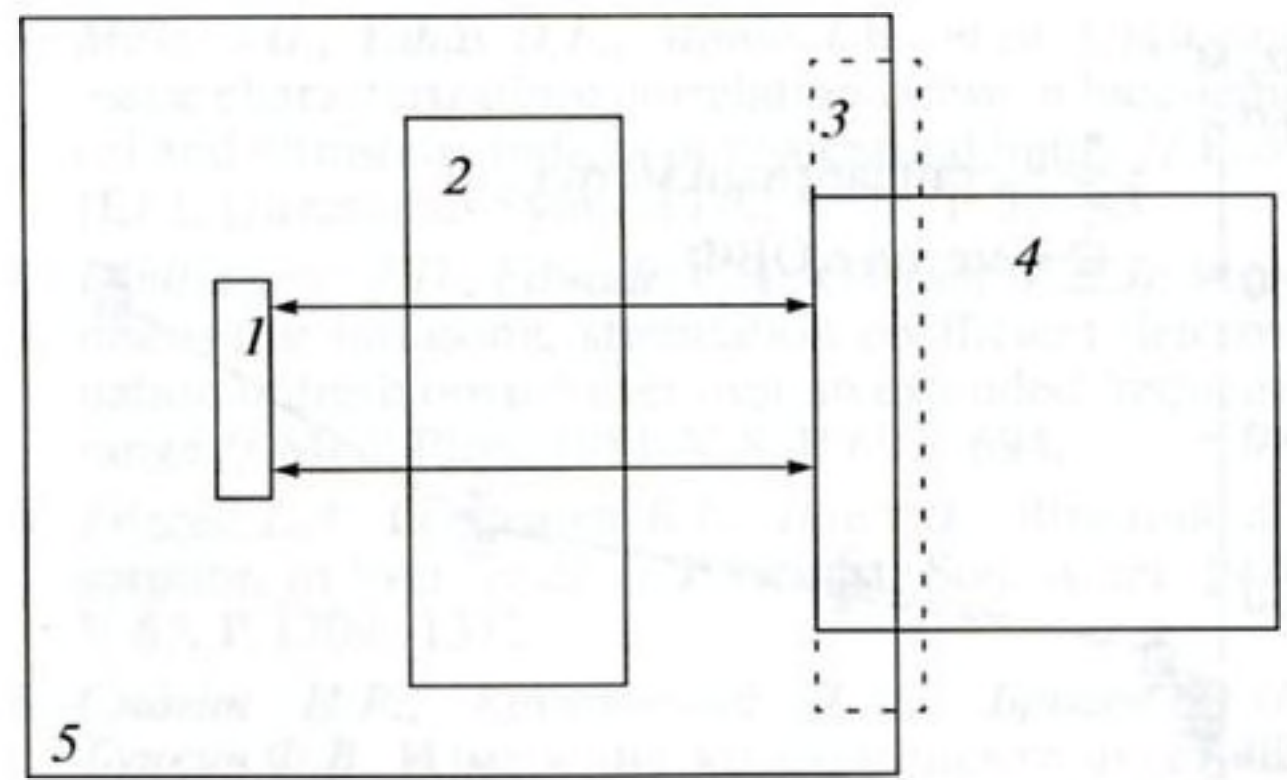


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — ультразвуковой преобразователь, 2 — образец, 3 — отражающая пластина, 4 — устройство ОВФ, 5 — бассейн с водой. Стрелками условно показаны направления распространения звуковых пучков.

энергии, что позволяет представить коэффициент затухания в виде [11]:

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha = \alpha_0 + \alpha_s + \alpha_\eta + \alpha_T, \quad (2)$$

где α_0 — суммарный коэффициент собственного поглощения ультразвука всеми фазами среды, α_s — вклад рассеяния, величина α_η описывает инерциальные вязкостные потери, α_T — коэффициент поглощения, обусловленный неравновесным теплообменом между фазами. Сумма коэффициентов потерь на рассеяние, трение и теплообмен составляет величину дополнительного коэффициента ослабления в неоднородных средах $\Delta\alpha$. Нас будет в дальнейшем интересовать соотношение между затуханием α и суммарными диссипативными потерями $\alpha_d = \alpha_0 + \alpha_\eta + \alpha_T$, которые будем называть поглощением неоднородной среды, различая таким образом обратимые и необратимые потери.

Для экспериментов были приготовлены две серии образцов на основе желатина, разведенного в воде при 18% весовой концентрации. Все образцы были выполнены в виде дисков диаметром 46 мм и толщиной 25 мм. Образцы закреплялись в пластиковых цилиндрических держателях так, что плоские поверхности дисков были перпендикулярны звуковому пучку.

Первая серия образцов содержала случайно распределенные по объему алюмосиликатные микросферы со средним радиусом $r_m = 20$ мкм. По оценкам объемная концентрация частиц в образцах данной серии составляла от 0.025 до 1.8%. Ввиду малости размеров рассеивающих объектов и технологических особенностей изготовления образцов точное измерение объемной концентрации дисперсной составляющей было затруднено. Так как длина волны используемых в работе зондирующих ультразвуковых волн частотой 5 МГц в желатине составляет примерно 300 мкм, что много

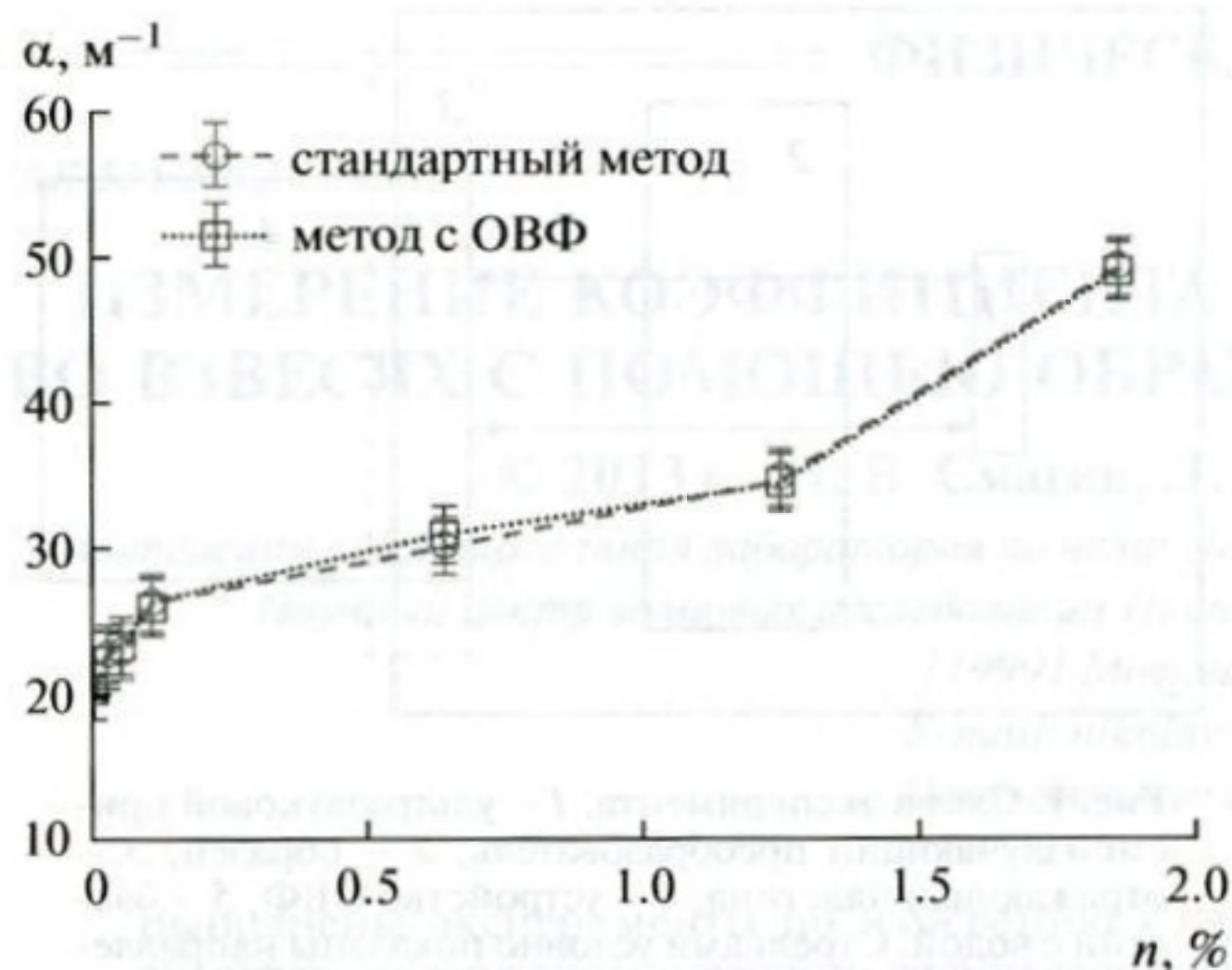


Рис. 2. Зависимость измеренного коэффициента акустического поглощения от объемной концентрации алюмосиликатных микросфер средним диаметром 20 мкм: штриховая линия — измерения стандартным методом; пунктирная линия — измерения с ОВФ.

больше радиуса частиц, параметр рассеяния kr_m (k — волновое число) равен 0.42, что соответствует так называемому длинноволновому режиму рассеяния звука на включениях [12]. При взаимодействии звука со скоплениями твердых частиц в длинноволновом режиме преобладающими механизмами дополнительного затухания являются дипольное рассеяние α_{sd} и вязкостные потери α_η [13]. Проведенные сравнительные эксперименты показали, что для этой серии образцов результаты измерений стандартным методом и методом с использованием ОВФ достаточно хорошо совпадают во всем диапазоне концентраций (рис. 2). Это свидетельствует о том, что компенсация рассеяния (с помощью ОВФ) не приносит видимого результата, и, следовательно, эффекты рассеяния в данных условиях проявляются значительно слабее, чем диссипативные потери.

Вторая серия экспериментов проводилась с образцами, содержащими случайно распределенные в объеме стеклянные микрошарики. Диаметры шариков были распределены по логнормальному закону со средним значением $r_m = 300$ мкм и стандартным отклонением $\Delta r \approx 30$ мкм. Таким образом, длина волны зондирующих пучков была сопоставима с размерами включений (параметр рассеяния $kr_m = 6.28$), что соответствовало т.н. средневолновому режиму взаимодействия звука с частицами, в котором упругое рассеяние α_s становится более интенсивным [13]. Концентрация шариков и статистика их распределения по размерам определялась при помощи цифровой обработки фотоизображений рассыпанной фракции. Таким образом, при проведении экспериментов

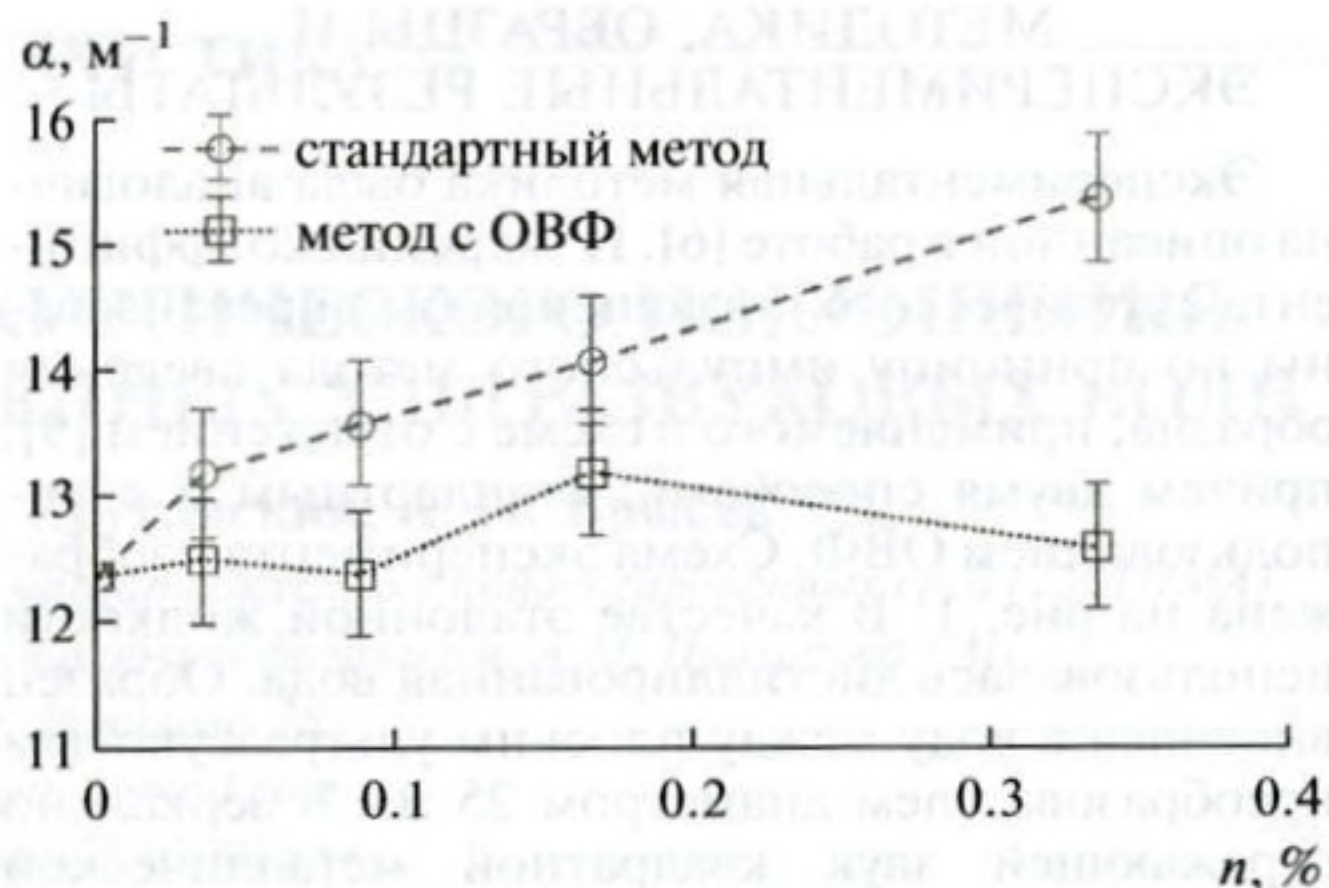


Рис. 3. Зависимость измеренного коэффициента акустического поглощения от объемной концентрации стеклянных микрошариков средним диаметром 300 мкм: штриховая линия — измерения стандартным методом; пунктирная линия — измерения с ОВФ.

объемная концентрация дисперсной фазы была точно известна. Доминирующий механизм акустических потерь определяется не только режимом распространения зондирующих пучков, но и степенью различия параметров взвешенных частиц и вмещающей среды. В частности, рассеяние преобладает над остальными видами потерь в образцах с существенным отличием плотностей двух фаз. Например, в работе [14] при использовании взвеси карборундового порошка в желатине ($kr_m = 2.08$) вклад рассеяния α_s в дополнительный коэффициент затухания $\Delta\alpha$ составил 100% в диапазоне объемных концентраций от 0.005 до 1%.

На рис. 3 приведены результаты измерения поглощения в образцах с объемными концентрациями дисперсной фазы от 0 до 0.33%. С ростом концентрации рассеивателей в стандартном методе измеренное затухание растет, а в методе с ОВФ практически не меняется в пределах такой же погрешности измерений. Поскольку стандартная методика без ОВФ не разделяет необратимые потери на поглощение и ослабление амплитуды сигнала из-за влияния рассеяния, то это означает, что рост затухания в первом методе обусловлен только «компенсируемыми» потерями. Основной вклад в наблюдающийся рост потерь вносит рассеянием, а поглощение практически не растет. Таким образом, точность измерения коэффициента поглощения в методе с ОВФ оказывается выше.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в средневолновом режиме рассеяния и при малых концентрациях включений применение эффекта ОВФ позволяет компенсировать значительную часть рассеяния. Из сравнения кривых на рис. 3 видно, что определяемое стандартным методом увеличение затухания с ростом концен-

трации взвеси фактически обусловлено только упругим рассеянием, а не диссипативными потерями. Результаты измерений с помощью ОВФ слабо зависят от концентрации взвеси и почти не выходят за пределы погрешности измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В зависимости от длины волны зондирующего пучка и степени различия физических свойств частиц и сплошной среды во взвесах преобладают различные механизмы акустических потерь. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что использование обращенных ультразвуковых пучков позволяет успешно компенсировать упругое рассеяние, преобладающее в средневолновом режиме, и не дает различий в длинноволновом режиме, когда основными механизмами затухания являются вязкостные потери. В случае средневолнового режима взаимодействия звука со слабо концентрированными скоплениями твердых частиц ОВФ зондирующего пучка позволяет получать достоверные данные об акустическом поглощении в исследуемых образцах.

Работа выполнена при поддержке программы ОФН РАН “Фундаментальные основы акустической диагностики искусственных и природных сред” и гранта НШ-214.2012.2. Авторы выражают благодарность компании ГК “ИНОТЭК” за предоставленные фракции микросфер и микрошариков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бэмбер Дж., Дикинсон Р., Эккерсли Р. и др. / Ультразвук в медицине. Физические основы применения. Под. ред. Дж. Бэмбера. М.: Физматлит, 2008. 542 с.
2. Marcus P.W., Carstensen E.L. Problems with absorption measurements of inhomogeneous solids // J. Acoust. Soc. Amer. 1975. V. 58. P. 1334–1335.
3. Miller J.G., Yuhas D.E., Mimbs J.W. et al. Ultrasonic tissue characterization: correlation between biochemical and ultrasonic indices of myocardial injury // Proc. IEEE Ultrasonics Symp. 1976. № 76. P. 33–43.
4. Pohlhammer J.D., Edwards C.A., O'Brien W.D.Jr. Phase insensitive ultrasonic attenuation coefficient determination of fresh bovine liver over an extended frequency range // Med. Phys. 1981. V. 8. P. 692–694.
5. Frizzell L.A., Cerstensen E.L., Davis D. Ultrasonic absorption in liver tissue // J. Acoust. Soc. Amer. 1979. V. 65. P. 1309–1312.
6. Смагин Н.В., Крутянский Л.М., Брысев А.П., Бункин Ф.В. Измерение коэффициента акустического поглощения с помощью обращенных ультразвуковых волн // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 4. С. 470–478.
7. Brysev A.P., Bunkin F.V., Krutyansky L.M., Smagin N.V. Phase conjugation for measuring ultrasound absorption in inhomogeneous media // Phys. Wave Phenom. 2010. V. 18. № 2. P. 143–146.
8. Fossheim K., Holt R.L. Critical dynamics of sound in $KMnF_3$ // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. P. 730–733.
9. Dunn F., Edmonds P.D., Fry W.J. Absorption and dispersion of ultrasound in biological media: Biological engineering Ed. Schwan H.P. N.Y.: McGraw-Hill, 1969. P. 205–332.
10. Брысев А.П., Бункин Ф.В., Крутянский Л.М., Преображенский В.Л., Пыльнов Ю.В., Стаховский А.Д. Параметрическое обращение фронта ультразвуковых волн в воде в широком угловом диапазоне // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 2. С. 244–247.
11. Allegra J.R., Hawley S.A. Attenuation of sound in suspensions and emulsions: theory and experiments // J. Acoust. Soc. Amer. 1972. V. 51. № 3. P. 1545–1564.
12. McClements D.J. Principles of ultrasonic droplet size determination in emulsions // Langmuir. 1996. V. 12. P. 3454–3461.
13. Challis R.E., Povey M.J., Mather M.L., Holmes A.K. Ultrasound techniques for characterizing colloidal dispersions // Rep. Prog. Phys. 2005. V. 68. P. 1541–1637.
14. Кольцова И.С., Михайлов И.Г. Ослабление и рассеяние ультразвуковых волн во взвесах // Акуст. журн. 1975. Т. 21. № 4. С. 568–575.