

Литература

1. Смольская Т.И., Жуковская А.И., Рубинов А.Н. // Журн. прикл. спектр. 1972. **14**, № 5. С. 775.
2. Смирнов В.С., Забиякин Ю.Е., Бахшиев Н.Г. // Опт. и спектр. 1975. **38**, № 3. С. 591.
3. Южаков В.И., Салецкий А.М., Ужинов Б.М., Примак В.И. // Журн. физ. химии. 1985. **59**, № 7. С. 1664.
4. Салецкий А.М., Южаков В.И. // Квант. электроника. 1985. **12**, № 2. С. 294.
5. Chin S.I., Leclerc L., Bedard G. // Opt. Comm. 1972. **6**, No. 3. P. 264.
6. Акимов А.И., Баранов А.Н., Левишин Л.В., Салецкий А.М. // Журн. прикл. спектр. 1996. **63**, № 2. С. 236.
7. Левишин Л.В., Салецкий А.М. Оптические методы исследования молекулярных систем. Т. 1. Молекулярная спектроскопия. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1994.
8. Левишин Л.В., Салецкий А.М. Лазеры на основе сложных органических соединений. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1992.
9. Левишин Л.В., Салецкий А.М. Люминесценция и ее измерения. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1989.
10. Левин М.Б., Рева М.Г., Родченкова В.В., Ужинов Б.М. // Квант. электроника. 1986. **13**, № 6. С. 1272.
11. Лазеры на красителях / Под ред. В.П. Шефера. М.: Мир, 1976.
12. Акимов А.И., Королькова Н.В., Курохтин Н.В. и др. // Квант. электроника. 1988. **15**, № 5. С. 989.

Поступила в редакцию
05.07.00

АКУСТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

УДК 534.222

ГЕНЕРАЦИЯ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СДВИГОВЫХ ВОЛН В РЕЗИНОПОДОБНОЙ СРЕДЕ С ПОМОЩЬЮ СФОКУСИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКА

В. Г. Андреев, А. В. Ведерников

(кафедра акустики)

E-mail: andreev@acs366b.phys.msu.su

Предложена и реализована схема возбуждения и регистрации волн сдвига в резиноподобных средах с помощью ультразвука (УЗ). Сдвиговая волна возбуждалась в образце при поглощении мощного сфокусированного УЗ-импульса субмиллисекундной длительности. Профиль возникающей сдвиговой волны и скорость ее распространения определялись с помощью фокусирующего преобразователя по смещению микрочастицы, увлекаемой сдвиговой волной. Измеренная величина скорости сдвиговой волны согласуется с рассчитанной с учетом модуля сдвига, определенного независимым методом.

Введение

Упругость мягких биологических тканей с патологическими изменениями и упругость здоровых тканей существенно отличаются: сдвиговые модули упругости для многих опухолей в десятки раз выше [1]. Поэтому разработка методов визуализации распределения модуля упругости в биологических тканях является одним из актуальных и бурно развивающихся направлений медицинской диагностики.

В настоящее время можно выделить несколько основных подходов в решении указанной проблемы. В работах [1, 2] предложен метод визуализации упругих свойств по регистрации амплитуды установившихся колебаний внутри образца. Колебания возбуждаются на поверхности образца механическим вибратором, а амплитуда колебаний внутри объекта измеряется при помощи УЗ-преобразователя по доплеровскому сдвигу частоты. Основным недостатком данного метода является существенное влияние собственных мод образца на результаты измерений. В методе, названном авторами «эластография» [3, 4],

области с упругой неоднородностью детектируются по отличию деформации этой области при приложении механической нагрузки от деформации однородной среды. Для выявления отличий в деформации объекта используется стандартная аппаратура УЗ-диагностики.

В статье [5] представлен новый метод визуализации упругих свойств среды при помощи сдвиговых волн. Предложенная схема позволяет локализовать деформацию в очень малом объеме среды, используя дистанционный метод генерации сдвиговой волны с помощью модулированной продольной УЗ-волны. Акустическая волна, распространяясь в поглощающей среде, в частности в биологической ткани, передает ей свой импульс. В этом случае область звукопоглощения становится источником распространяющихся упругих возмущений, в том числе и волн сдвига. Возбуждение волн сдвига происходит наиболее эффективно в областях высоких градиентов интенсивности продольной волны. Указанная ситуация имеет место в области перетяжки сфокусированного акустического пучка, поперечный размер

которой может быть сравним с длиной продольной волны. Результаты экспериментальной реализации этого метода представлены в работах [6, 7]. В работе [6] регистрация сдвиговой волны проводилась оптическим методом по отклонению микрочастицы, «вмороженной» в оптически прозрачный образец. В работе [7] сдвиговая волна, возбужденная сфокусированным ультразвуком, наблюдалась с помощью ЯМР-томографа. Однако оптическая регистрация не может быть применена на реальных непрозрачных биологических тканях, использование же ЯМР-томографа для этих целей достаточно дорого. В настоящей работе регистрация сдвиговых смещений внутри гелеобразного образца осуществлена с использованием УЗ-методики.

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Генерация сдвиговой волны осуществлялась с помощью фокусирующего пьезопреобразователя (1), резонансная частота которого составляла 3.109 МГц. Излучатель имел радиус кривизны 70 мм и диаметр 65 мм. Возбуждение пьезопреобразователя (1) производилось электрическими импульсами длительностью 150 мкс, подаваемыми с выхода ультразвукового генератора-усилителя (4). В фокальной области акустического излучателя (1) помещался образец (3). В качестве образца использовался желатиновый кубик размерами 4 × 4 × 4 см, изготовленный из 5%-го раствора желатина. В срединном сечении этого кубика была вморожена пенопластовая частичка с размерами 1 × 1 мм. Для регистрации сдвигового импульса использовался зондирующий фокусирующий пьезопреобразователь (2), практически идентичный излучателю (1). В его фокусе помещалась пенопластовая частичка; отраженный от нее УЗ-импульс принимался зондирующим пьезопреобразователем. Пьезопреобразователи и образец погружались в кювету с водой размерами 15 × 20 × 60 см. Оба пьезопреобразователя закреплялись на специальных держателях и могли плавно перемещаться в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Импульсы длительностью 10 мкс с выхода генератора типа НР 33120А (6) использовались для возбуждения зондирующего излучателя. Импульсы генератора (6)

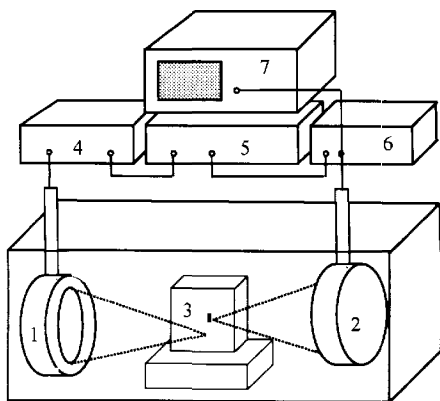


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

были синхронизованы с импульсами генератора (1) и задержаны относительно них на строго определенное время с помощью источника временных сдвигов типа И1-8 (5). Импульс, отраженный от пенопластовой частички, регистрировался с помощью осциллографа типа Tektronix TDS 520A (7). Синхронизация осциллографа также осуществлялась импульсами генератора (1).

Методика проведения измерений

Перед началом работы возбуждающий и зондирующий излучатели располагались с противоположных сторон и фокусировались на отражающую частичку внутри образца. После этого зондирующий излучатель больше не перемещался. Излучатель, возбуждающий сдвиговую волну, смещался вверх или вниз от частички с шагом 0,5 мм. Диаграмма импульсов, поясняющая методику измерений, приведена на рис. 2. Акустический импульс (а) фокусировался в исследуемый образец. В области перетяжки пучка ($r = 0$) возбуждалась сдвиговая волна (б), имеющая вид дипольного импульса. Положительное смещение частиц в сдвиговой волне совпадает с направлением распространения падающего акустического пучка. Длительность сдвигового импульса определяется временем пробега сдвиговой волны по области перетяжки: $\tau = a/c_t$, где a — радиус перетяжки, c_t — скорость распространения сдвиговой волны. Отрицательный «хвост» импульса соответствовал смещению частиц в сторону возбуждающего излучателя. От области генерации до точки нахождения отражающей частички сдвиговая волна доходит за конечный промежуток времени (рис. 2, в), при этом ее амплитуда заметно уменьшается. Движение вмороженной легкой частички отслеживало смещение среды. Смещение частички в последующие моменты времени отмечено точками на профиле (е). Зондирующие импульсы (г) излучались с задержкой t_i , величина которой могла изменяться в пределах нескольких миллисекунд с дискретностью 1 нс. Нестабильность времени задержки от импульса к импульсу не превышала ± 0.5 нс, что позволяло проводить усреднение

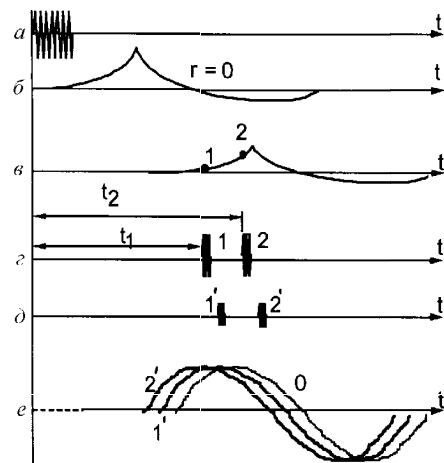


Рис. 2. Диаграмма, поясняющая взаимное положение импульсов, используемых в эксперименте

по большому числу импульсов и тем самым повысить точность измерений фазы волны. Импульсы, отраженные от частички (d), принимались зондирующим преобразователем и отображались на экране осциллографа. Растянутые во времени фрагменты отраженных импульсов показаны на рис. 2, *e*. Сначала фиксировалась начальная фаза отраженной волны, соответствующая неподвижной частичке (кривая θ). При смещении частички в сторону зондирующего излучателя соответствующее время задержки уменьшалось (кривые $1'$ и $2'$). Изменение фазы отраженной волны было тем больше, чем больше было смещение в сдвиговой волне. Таким образом, изменяя время задержки зондирующего импульса, мы имели возможность восстановить временной профиль сдвигового импульса. Такие определения профиля импульса были проведены на расстояниях до 2.5 мм от оси возбуждающего излучателя с шагом 0.5 мм.

Результаты измерений

На рис. 3 представлен измеренный профиль сдвиговой волны на расстоянии 1 мм от оси возбуждающего излучателя. Сдвиговый импульс имел явно выраженный максимум; примерно через 1.5 мкс после первого отмечался второй максимум. Время нарастания импульса составляло 0.5 мс и было примерно в два раза меньше времени спада. Форма импульса практически не изменялась при увеличении расстояния от области возбуждения, если не считать уменьшения амплитуды, связанного с затуханием.

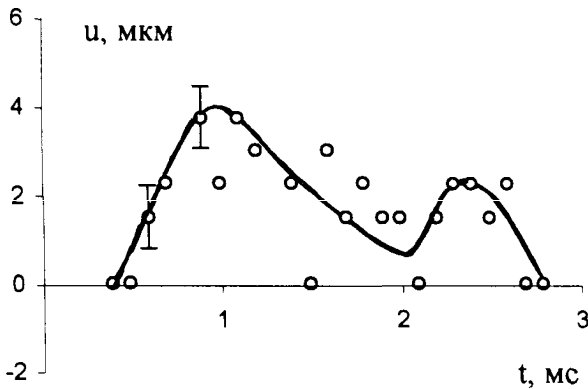


Рис. 3. Зависимость смещения частицы u от времени t

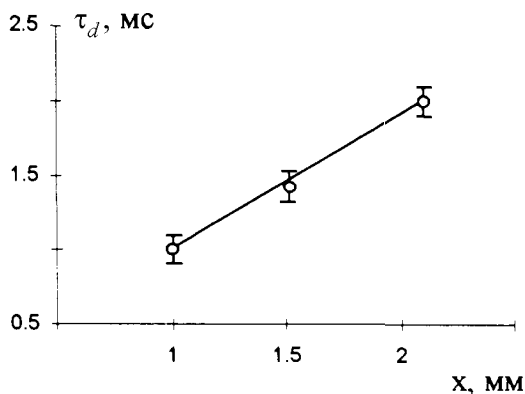


Рис. 4. Зависимость времени задержки максимума сдвигового импульса τ_d от расстояния x до частички

Как было показано в работе [6], максимум импульса распространяется со скоростью сдвиговой волны. По измерению времени прихода максимума сдвигового импульса на различных расстояниях от частички (рис. 4) была определена скорость сдвиговой волны. Прямая, показанная на рис. 4, соответствует скорости $c_t = 0.9 \pm 0.1$ м/с. Максимальные смещения, зарегистрированные в эксперименте, хорошо соответствуют теоретическим расчетам, выполненным по формулам, приведенным в работе [6].

Пусть на образец с коэффициентом поглощения звука α и плотностью ρ падает УЗ-волна с интенсивностью I . Тогда в области перетяжки УЗ-пучка радиусом a возбуждается сдвиговая волна, максимальное смещение в которой можно оценить по формуле $u_{\max} = \alpha I t_0 / (\rho c_l c_t)$, где t_0 — длительность УЗ-импульса, c_l и c_t — скорость продольной и сдвиговой волн соответственно. Используя параметры УЗ-импульса и пьезопреобразователя ($I = 540$ Вт/см², $t_0 = 150$ мкс, $a = 1$ мм), а также характеристики желатинового образца ($\rho = 1$ г/см³, $c_l = 1500$ м/с, $c_t = 0.9$ м/с, $\alpha = 0.1$ см⁻¹), можно для максимального смещения получить следующую оценку: $u_{\max} = 6$ мкм.

Модуль сдвига, соответствующий найденной скорости в желатиновом образце, равен $\mu = 0.8 \pm \pm 0.1$ кПа. Сдвиговый модуль образца измерялся также независимо статическим методом по вдавливанию в него жесткого шарика. Было использовано решение контактной задачи Герца о соприкосновении двух тел. При вдавливании жесткого шарика в упругий слой глубина вдавливания при заданной приложенной силе зависит от радиуса шарика, величины силы и сдвигового модуля слоя [8]. Поэтому, измеряя глубину проникновения шарика в упругий слой под действием заданной силы, можно было рассчитать величину модуля сдвига. Такие измерения были проведены, и было получено, что для 5%-го желатина величина сдвигового модуля составляет 1.4 ± 0.2 кПа. Отличия в полученных величинах относительно велики, что можно объяснить размягчением желатиновых образцов при помещении их в воду. Статические же измерения были проведены на предварительном этапе, до экспериментов в воде. Мы планируем в дальнейшем проведение серии экспериментов с одновременным контролем сдвигового модуля двумя описанными методами.

Работа выполнена при поддержке программы «Университеты России» (грант 1-5286) и РФФИ (грант 98-02-17318).

Литература

1. Parker K.J., Huang S.R., Musulin R.A. et al. // *Ultrasound in Med. and Biol.* 1990. 16, No. 3. P. 241.
2. Gao L., Parker K.J., Alam S.K. et al. // *J. Acoust. Soc. Am.* 1995. 97, No. 6. P. 3875.
3. Ophir J., Cespedes E.I., Ponnekanti H. et al. // *Ultrason. Imag.* 1991. 13. P. 111.

4. Varghese T., Ophir J. // Proc. IEEE Symp. on Ultrasonics. 1997. **44**, No. 1. P. 1128.
5. Rudenko O.V., Sarvazyan A.P., Emelianov S.Y. // J. Acoust. Soc. Am. 1995. **99**, No. 5. P. 2791.
6. Андреев В.Г., Дмитриев В.Н., Пицальников Ю.А. и др. // Акуст. журн. 1997. **43**, № 2. С. 149.
7. Sarvazyan A.P., Rudenko O.V., Swanson S.D. et al. // Ultrasound in Med. and Biol. 1998. **24**, No. 9. P. 1419.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1965.

Поступила в редакцию
10.05.00

УДК 534.222

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СПЕКТРА АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В КАВИТИРУЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

В. Г. Андреев, Г. А. Романенко

(кафедра акустики)

E-mail: andreev@acs366b.phys.msu.su

Описана экспериментальная установка и методика для определения времени установления стационарной кавитации в жидкости по эволюции спектра кавитационного шума. Приведены временные зависимости амплитуд гармоник как вблизи излучателя, так и за пределами кавитационной области. По виду этих зависимостей оценены характерные времена установления развитой кавитации в воде и трансформаторном масле.

Определение характерных времен установления процесса развитой кавитации в жидкостях имеет принципиальное значение для выбора оптимальных режимов в технологиях, использующих ультразвуковую (УЗ) кавитацию [1, 2]. Особенно это важно в сонохимии при инициировании быстропротекающих химических реакций [3]. Скоростная фотосъемка является наиболее известным методом, использующимся для изучения процесса развития кавитационной области. В работе [4] процесс зарождения и развития кавитации в воде регистрировался с помощью сверхскоростной фотокамеры. Кавитация наблюдалась в фокусе акустического концентратора, работающего на частоте 500 кГц. Было отмечено, что при используемых интенсивностях время образования кавитационной области в фокусе концентратора составляет 15–45 периодов УЗ-колебаний. Аналогичный эксперимент с использованием низкочастотного (15 кГц) излучателя был проведен В.А. Акуличевым [5]. Процесс развития кавитации регистрировался кинокамерой при скорости съемки 200 000 кадров в секунду, что дало возможность детально изучить поведение отдельного пузырька и кавитационной области в целом в течение как одного, так и многих периодов УЗ-колебаний. Количество кавитационных пузырьков, увеличиваясь со временем, приблизительно через 10 периодов достигало насыщения.

Однако подобный метод может использоваться только в прозрачных жидкостях, и, самое главное, с его помощью можно определить только время, требуемое для образования кавитационной области, но не время установления стационарного режима кавитации. Как показали наши измерения, эти времена существенно отличаются. В настоящей работе изучена эволюция спектра кавитационного шума и

по виду зависимостей амплитуд гармоник от времени определено время установления стационарной кавитации.

Возбуждение кавитации производилось при помощи УЗ-генератора. Промышленный УЗ-генератор типа УЗГ3-4 мощностью 4 кВт, работающий на частоте 18 кГц, использовался для питания магнестрикционного преобразователя ПМС 15А-18. Магнестрикционный преобразователь был снабжен титановым излучателем гантелевидной формы, которая позволяла получить увеличение амплитуды колебаний торца в 1.5–2 раза при сохранении площади излучаемой поверхности. Торцевой излучатель погружался в кювету размерами 400 × 63 × 63 мм, изготовленную из оргстекла. Диаметр входного отверстия кюветы лишь немного превышал диаметр торца излучателя, что способствовало уменьшению захвата воздуха с поверхности жидкости в кавитационном режиме. Кювета заполнялась исследуемой жидкостью — отстоявшейся кипяченой водой или трансформаторным маслом, имеющим повышенную кавитационную прочность по сравнению с водой. Поле акустического давления в кювете измерялось сферическим гидрофоном диаметром 7 мм с резонансной частотой 230 кГц. Размеры гидрофона были малы по сравнению с длиной УЗ-волны ($\lambda = 8.3$ см), следовательно, его присутствие практически не возмущало структуру звукового поля. С другой стороны, он был достаточно большим, чтобы измерять усредненное поле, возникающее при схлопывании сразу многих пузырьков вблизи его поверхности. Высокая собственная резонансная частота гидрофона обеспечила возможность регистрации первых 8–10 гармоник основной частоты УЗ-колебаний с равномерной чувствительностью. Принимаемый гидрофоном сигнал посту-