

Применение эффекта радиационного давления для измерения потерь энергии ультразвукового пучка при его прохождении через расположенный в жидкости твердотельный слой

Ж. В. Черепанова,^{*} М. А. Крыжановский,[†] С. А. Цысарь,[‡] О. А. Сапожников[§]

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

(Статья поступила 10.07.2017; Подписана в печать 03.10.2017)

При прохождении акустической волны через расположенный в жидкости твердотельный слой возникают энергетические потери, вызванные как поглощением в слое, так и отражениями от его границ. Поскольку неоднородный по толщине слой вызывает заметные искажения волнового фронта, то традиционный способ измерения потерь, основанный на регистрации уменьшения амплитуды плоской волны, оказывается неприменимым. В этих условиях требуется измерять мощность волны методом, не чувствительным к амплитудно-фазовой структуре акустического поля. В настоящей работе в качестве такого метода предлагается подход, основанный на измерении радиационной силы, оказываемой ультразвуковым пучком на протяжённый поглотитель.

PACS: 43.25.Ed

УДК: 534.833, 532.3

Ключевые слова: радиационная сила, коэффициент прохождения, коэффициент отражения, мощность волны.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих приложениях ультразвука в медицине и неразрушающем контроле возникают ситуации, когда ультразвуковой пучок пропускается через поглощающий или рассеивающий участок среды, вносящий потери. Поскольку неоднородности вызывают искажения волнового фронта, то оказывается невозможным использование традиционного способа измерения потерь, основанного на регистрации уменьшения амплитуды квазиплоской волны. Более адекватной альтернативой является проведение измерений каким-либо методом, не чувствительным к фазе волны. В качестве такого метода может служить подход, основанный на измерении радиационной силы. Как известно, волна переносит не только энергию, но и импульс. Если при распространении в пространстве волна встречает какое-нибудь препятствие, ее импульс изменяется и частично передается этому объекту, и на него начинает действовать так называемая радиационная сила. В простейшем случае падения плоской волны на абсолютно поглощающее тело эта сила пропорциональна полной поглощенной мощности:

$$F_{rad} = \frac{W}{c},$$

где F_{rad} — радиационная сила, W — мощность волны, c — скорость волны. В отличие от случая световых волн, получить заметную акустическую радиационную силу проще, поскольку скорость звука меньше свето-

вой на пять порядков. Так как величина силы зависит от полной мощности и не чувствительна к фазе волны, появляется возможность измерения поглощения волны при прохождении через рассеивающие и поглощающие препятствия. Существует несколько способов измерения радиационной силы [1]; один из них и будет представлен в настоящей работе.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ СЛОЙ

Рассмотрим задачу о прохождении плоской акустической волны через плоскопараллельный поглощающий слой. Пусть L — толщина слоя, а ρ_j и c_j — плотность и скорость звука в двух рассматриваемых средах, где индекс $j = 1$ относится к окружающей слой среде, $j = 2$ соответствует материалу слоя. Пусть также φ — угол падения на слой. Согласно закону Снеллиуса угол преломления равен

$$\psi = \arcsin \left(\frac{c_2}{c_1} \sin \varphi \right).$$

Рассматриваемая задача о прохождении волны через слой имеет известное решение. В частности, выражения для коэффициентов прохождения T и отражения R имеют следующий вид [2]:

$$T = \frac{4n \cos \varphi \cos \psi e^{-ik_1 L \cos \varphi}}{(\cos \psi + n \cos \varphi)(\cos \psi + n) e^{-ik_2 L \cos \psi} - (\cos \psi - n \cos \varphi)(\cos \psi - n) e^{ik_2 L \cos \psi}},$$

$$R = \frac{(\cos \psi + n \cos \varphi)(\cos \psi - n) e^{ik_2 L \cos \psi} - (\cos \psi - n \cos \varphi)(\cos \psi + n) e^{-ik_2 L \cos \psi}}{(\cos \psi + n \cos \varphi)(\cos \psi + n) e^{-ik_2 L \cos \psi} - (\cos \psi - n \cos \varphi)(\cos \psi - n) e^{ik_2 L \cos \psi}}.$$

Здесь $n = z_1/z_2$, $z_1 = \rho_1 c_1$ и $z_2 = \rho_2 c_2$ — акустические импедансы жидкости и материала слоя, соответственно, $k_1 = \omega/c_1$ и $k_2 = \omega/c_2 + i\alpha$ — соответствующие волновые числа, α — коэффициент поглощения в материале слоя; окружающая среда предполагается непоглощающей. Нетрудно видеть, что в отсутствие поглощения ($\alpha = 0$) выполняется закон сохранения энергии $|T|^2 + |R|^2 = 1$.

С точки зрения сравнения с экспериментом, интерес представляет коэффициент прохождения по интенсивности, равный $|T|^2$. Как видно из приведенного выше выражения для T , коэффициент прохождения зависит не только от толщины пластины, но и от угла падения. На рис. 1 приведены результаты расчетов для нескольких пластин, использованных в описанных ниже экспериментах. Видно, что в указанных случаях зависимость от угла падения относительно слаба, особенно при малой величине угла падения (почти перпендикулярное падение). Это означает, что при использовании слабо расходящихся пучков коэффициент прохождения по мощности должен быть близок к коэффициенту прохождения по интенсивности для плоской волны, падающей на исследуемый слой вдоль направления оси пучка.

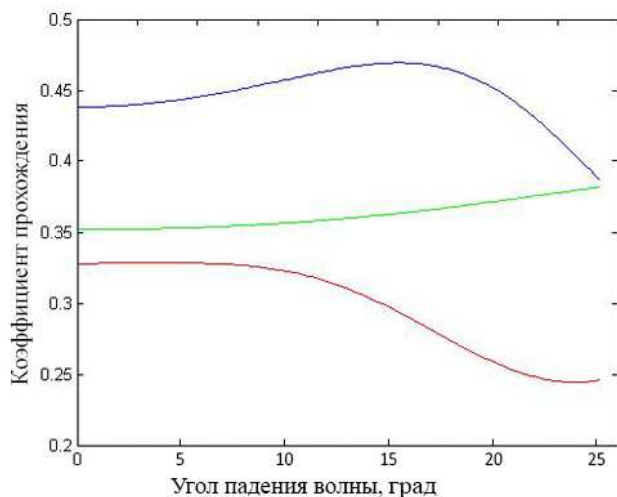


Рис. 1: Теоретические зависимости коэффициента прохождения по интенсивности для пластин из оргстекла толщиной 18.95 мм (синяя кривая) и 30 мм (красная кривая). Зеленая кривая — пластина толщиной 6.5 мм из материала, используемого для создания акустических фантомов кости черепа

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПУЧКА ЧЕРЕЗ ПОГЛОЩАЮЩИЙ СЛОЙ

Для экспериментального исследования предложенного фазонечувствительного метода измерения потерь при прохождении ультразвука через слой была разработана и собрана установка, показанная на рис. 2. В аквариум с водой устанавливалась легкая прочная рамка, внешняя часть которой стояла на прецизионных весах. На рамке покоился резиноподобный поглотитель, который и позволял определить значение радиационной силы, поглощая падающую на него ультразвуковую волну. Также в аквариум устанавливались на нужной высоте подставки под исследуемый образец, чтобы он не касался поглотителя. На оптимально подобранной высоте, обеспечивающей попадание всей волны на поглотитель, крепился плоский пьезокерамический источник круглой формы диаметром 50 мм. Возможность менять угол его наклона обеспечивалась специальным поворотным устройством, шкала углов которого была проградуирована в диапазоне от 0° до 25°. Этот диапазон был выбран исходя из требования, чтобы не достигалось условие полного внутреннего отражения. Соответствующий критический угол падения $\varphi_c = \arcsin(c_1/c_2)$ для расположенного в воде слоя из оргстекла составляет около 34°.

Весы были подсоединены к персональному компьютеру, с которого с помощью специальной программы, написанной в среде LabVIEW, проводилось управление автоматизированным экспериментом. Генератор подавал через усилитель на излучатель синусоидальное напряжение амплитудой 200 мВ, которое усиливалось до 68.8 В, что можно было наблюдать на осциллографе. Данное значение напряжения соответствовало излучаемой акустической мощности 16 Вт. Временные интервалы, на которые в процессе измерений включался и выключался источник, подбирались с учетом свойства поглотителя нагреваться из-за воздействия на него ультразвуковой волны: длительность периода излучения была 3 с, а интервалы с выключенным источником, чтобы поглотитель успевал остыть, составляли 120 с. Измерения проводились на резонансной частоте излучателя 1.09 МГц. Для этой частоты предварительно в импульсном режиме было измерено значение коэффициента поглощения ультразвука. В имеющемся оргстекле оказалось $\alpha = 15.5 \text{ м}^{-1}$, а для фантома кости черепа коэффициент поглощения был равен $\alpha = 42.6 \text{ м}^{-1}$. Измеренные значения скорости звука в оргстекле и фантоме кости черепа составили 2720 и 2640 м/с, соответственно.

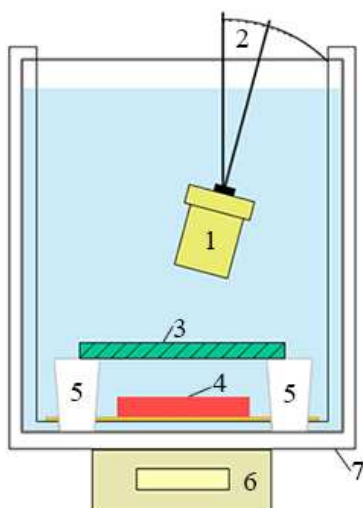


Рис. 2: Экспериментальная установка. 1 — излучатель, 2 — поворотное устройство, 3 — исследуемый материал, 4 — поглотитель, 5 — подставки для материала, 6 — прецизионные веса, 7 — рамка

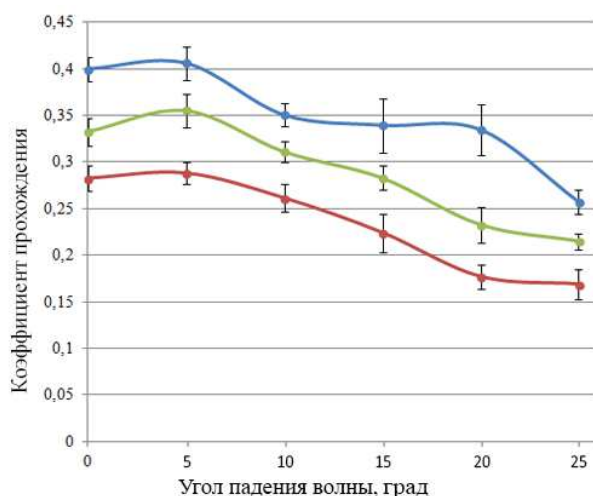


Рис. 3: Экспериментальная зависимость коэффициента прохождения волны по полной мощности для пластин из оргстекла и фантома кости черепа. Образец из оргстекла толщиной 18,95 мм — синяя кривая, толщиной 30 мм — красная кривая, фантомом кости черепа переменной толщины, со средним значением толщины около 6,5 мм — зеленая кривая

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОХОЖДЕНИЯ ЧЕРЕЗ ПЛАСТИНУ

Как отмечалось выше при обсуждении рис. 1, теория предсказывает слабую зависимость коэффициента прохождения от угла падения. Для проверки этого результата измерялась радиационная сила при падении ультразвукового пучка на поглотитель под различными углами. Для каждого угла проводилось два измерения радиационной силы — с исследуемой пластиной и в ее отсутствие, и коэффициент прохождения по акустической мощности вычислялся как отношение величин силы в двух указанных случаях.

Полученные в ходе эксперимента данные представлены на рис. 3, где разными цветами отмечены пластины и образец черепа. Наблюдается хорошее количественное соответствие с теоретическими значениями коэффициентов пропускания. Отметим, что экспериментальные значения для коэффициента прохождения получились ниже теоретических на 0,03–0,05 единиц. Кроме того, по мере увеличения угла падения экспериментальные кривые испытывают более быстрый спад по сравнению с теоретическими кривыми, показанными на рис. 1. Скорее всего, это связано с дополнительными потерями на отражение, вызванными отличием акустического пучка от плоской волны. Тем не менее, эксперимент подтвердил, что при малых углах падения волны от 0° до 10° коэффициент прохождения не испытывает сильной зависимости от угла падения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что радиационная сила и, как следствие, коэффициент прохождения материала не зависят сильно от малых углов падения волны, даже в случае неоднородного по толщине образца. Это также позволяет оценивать мощность поля волны после прохождения сквозь неровный слой черепа использованным в работе методом в силу его нечувствительности к амплитудно-фазовой структуре акустического поля.

Работа поддержана грантом РФФИ № 17-02-00261, грантом РНФ № 17-72-10284 и грантом Президента РФ по программе поддержки ведущих научных школ № НШ-7062.2016.2.

- [1] Beissner K. *Acustica*. 1987. **62**, N 4. P. 255.
- [2] Beissner K. J. *Acoust. Soc. Am.* 2010. **128**, N 6. P. 3355.
- [3] Лепендин Л.Ф. *Акустика. Учеб. пособие для вузов*. М.: Высш. школа, 1978.
- [4] Ржевкин С.Н. *Курс лекций по теории звука*. М: Изд-во Моск. ун-та, 1960.
- [5] Бреховских Л.М.. *Волны в слоистых средах*. Издание

- второе и переработанное. М.: Наука, 1973.
- [6] Крылов В.В. *Основы теории излучения и рассеяния звука*. М: Изд-во Моск. ун-та, 1989.
- [7] Кайно Г. *Акустические волны*. Пер. с англ. М: Мир, 1990.

The use of radiation pressure effect to measure energy losses of an ultrasonic beam during its passage through an inhomogeneous solid layer placed into the liquid

J. V. Cherepanova^a, M. A. Kryzhanovsky^b, S. A. Tsysar^c, O. A. Sapozhnikov^d

Department of Acoustics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
E-mail: ^azhanna321000@gmail.com, ^bkrimaxim2010@yandex.ru, ^csergeyt@physics.msu.ru, ^doleg@acs366.phys.msu.ru

When an acoustic wave passes through a solid layer located in the liquid, energy losses arise, caused both by absorption in the layer and by reflections from its boundaries. Since a layer inhomogeneous in thickness causes appreciable distortions of the wave front, the traditional method of measuring losses, based on recording the decrease in the amplitude of a plane wave, turns out to be inapplicable. Under these conditions, it is required to measure the wave power by a method that is not sensitive to the amplitude–phase structure of the acoustic field. In this paper, we propose an approach based on measuring the radiation force exerted by an ultrasonic beam on an extended absorber.

PACS: 43.25.Ed

Keywords: radiation force, transmission coefficient, reflection coefficient, wave power.

Received 10 July 2017.

Сведения об авторах

1. Черепанова Жанна Валерьевна — студентка; e-mail: zhanna321000@gmail.com.
2. Крыжановский Максим Андреевич — магистрант; e-mail: krimaxim2010@yandex.ru.
3. Цысарь Сергей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук; e-mail: sergeyt@physics.msu.ru.
4. Сапожников Олег Анатольевич — доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел. 8 (495) 939-29-52, e-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru.