

Определение характеристик поглощающих слоев с использованием акустической голографии

Д. А. Николаев,* С. А. Цысарь, В. А. Хохлова, О. А. Сапожников
*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*
(Статья поступила 15.11.2019; подписана в печать 25.11.2019)

Во многих приложениях, в том числе медицинских, необходимо с высокой точностью знать акустические характеристики твердых материалов, такие как скорость и поглощение упругих волн. Данная работа посвящена экспериментальному определению акустических параметров среды с использованием плосковолновых компонент углового спектра ультразвукового пучка, получаемых методом акустической голографии. Метод был опробован при характеристизации твердотельных материалов. Показано, что предложенный метод позволяет с высокой точностью измерять скорость звука и коэффициент поглощения продольных волн в широком частотном диапазоне.

PACS: 43.58.e

УДК: 534.6.08

Ключевые слова: акустическая голография, угловой спектр, плоские волны, характеристизация материалов, ультразвуковые преобразователи.

ВВЕДЕНИЕ

Широко используемые методы измерения акустических параметров твердых материалов, как правило, обладают достаточно большой для ряда применений погрешностью измерения (от 10%) [1]. В медицинских приложениях необходимо точно знать акустические параметры тканей, в которых распространяется ультразвук. Например, при планировании операций на головном мозге с использованием ультразвука (УЗ), необходимо максимально точно знать параметры костной ткани черепа, чтобы с помощью предварительных расчётов избежать перегрева тканей, связанного с поглощением акустических волн, а также разрушения здоровых тканей мозга, связанного с появлением побочных максимумов.

Важной особенностью существующих способов определения акустических характеристик материалов, таких как метод замещения [2] и метод введения образца [1], является использование приближения плосковолнового распространения [3]. С одной стороны, это оправдано простотой теоретического описания и обработки данных. Однако, с другой стороны, такое приближение может существенно снизить точность определения искомых параметров, так как даже для плоских УЗ источников реальное поле существенно отличается от плосковолнового. Все излучатели генерируют ограниченные акустические пучки с гетерогенной пространственной структурой в силу неидеальных граничных условий [4]. Создание практически плоского волнового фронта с использованием реальных излучателей можно реализовать в дальнем поле, что, в свою очередь, приводит к существенной потере интенсивности в области расположения исследуемых образцов

и предъявляет повышенные требования к чувствительности и динамическому диапазону приёмной системы, особенно в случае материалов с высокими коэффициентами поглощения.

В работе предложен новый способ определения частотной зависимости скорости звука и коэффициента поглощения твердых материалов с использованием акустической голографии [5]. Данный подход позволяет реализовать плосковолновой режим при передаче ультразвука через слой конечной апертуры даже в условиях сложной (не плосковолновой) структуры УЗ поля. В линейном режиме, в силу принципа суперпозиции, поле можно представить в виде набора плоских волн, распространяющихся через поглощающий слой независимо. Это даёт возможность работать с каждой из них отдельно, выделяя их из реальной структуры УЗ поля, например, с помощью метода углового спектра. Угловой спектр УЗ пучка может быть определен из двумерного голографического сканирования поля с помощью гидрофона малых волновых размеров. Таким образом решается проблема использования плосковолнового приближения в реальных УЗ пучках, а также появляется возможность существенно повысить точность определения параметров материала, так как точность определения структуры поля методом акустической голографии может достигать нескольких процентов [5].

Метод акустической голографии может быть применен как для узкополосной (в квазинепрерывном режиме), так и для импульсной характеристизации акустических полей [6], что позволяет использовать его для широкополосной характеристизации материалов. Кроме того, при использовании узкого акустического пучка, плоскопараллельный слой, в поперечном направлении перекрывающий распространяющийся пучок, может считаться бесконечным для плоских волн, составляющих весь угловой спектр. Следовательно, случай распространения плоской волны через бесконеч-

*E-mail: da.nikolaev@physics.msu.ru

ный в поперечном направлении слой может быть реализован при рассмотрении соответствующей компоненты углового спектра. Таким образом, путём подбора геометрии пучка можно регулировать требуемый для характеристики объём материала.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Идея предлагаемого метода характеристики материала заключается в выделении плоских волн, проходящих через исследуемый плоскопараллельный образец, погруженный в среду с известными характеристиками. Из данного набора плоских волн возможно выделить плоскую волну, падающую нормально к его поверхности, с последующим сравнением комплексной амплитуды этой волны с такой же плоской волной, распростра-

няющейся в среде без исследуемого образца. Для этого необходимо проведение измерений свободного поля, создаваемого излучателем без образца, а затем осуществление измерений поля в тех же точках при помещении образца между излучателем и поверхностью измерений. Регистрация поля вдоль поверхности измерений в большом количестве точек реализуется методом синтезированной апертуры путём последовательного перемещения гидрофона [5].

Для реализации метода достаточно проведения измерений при малых мощностях работы преобразователей в линейном режиме. Следовательно, имеется возможность перехода к спектральному представлению волны [7] как суммы монохроматических плоских волн, распространяющихся независимо в различном направлении:

$$P(x, y, z, t) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint_{-\infty}^{\infty} S(k_x, k_y; \omega, z) e^{(i\omega t - ik_x x - ik_y y)} d\omega dk_x dk_y, \quad (1)$$

$$S(k_x, k_y; \omega, z) = \iiint_{-\infty}^{\infty} P(x, y, z, t) e^{(-i\omega t + ik_x x + ik_y y)} dt dx dy, \quad (2)$$

где $P(x, y, z, t)$ — функция давления от времени и поперечных координат в некоторой плоскости z , $S(k_x, k_y; \omega, z)$ — соответствующий $P(x, y, z, t)$ угловой спектр в той же плоскости, $k_{\perp}^2 = k_x^2 + k_y^2$, k_x, k_y — поперечные компоненты волнового вектора в среде распространения вдоль осей x и y соответственно, они не зависят от частоты и определяются только размером голограммы и пространственным шагом измерения, ω — угловая частота волны. В данном случае голограмма представляет собой набор значений $P(x, y, t)$ вдоль плоскости $z = z_H$ (плоскость голограммы) в виде временных профилей сигнала с гидрофона в ограниченном наборе точек (x, y) .

Угловой спектр продольной волны S_0 при её распространении в иммерсионной жидкости (в качестве которой обычно используется вода) на расстояние H по оси z изменяется согласно формуле:

$$S_1(k_x, k_y; \omega) = S_0(k_x, k_y; \omega) e^{iH(\sqrt{(k_1 + i\alpha_1)^2 - k_{\perp}^2})}. \quad (3)$$

При распространении на такое же расстояние продольной волны, в случае, если параллельно излучателю установлен плоскопараллельный образец толщиной $h < H$, угловой спектр изменяется согласно формуле

$$S_2(k_x, k_y; \omega) = S_0(k_x, k_y; \omega) e^{i(H-h)(\sqrt{(k_1 + i\alpha_1)^2 - k_{\perp}^2}) + ih(\sqrt{(k_2 + i\alpha_2)^2 - k_{\perp}^2})} T_1 T_2. \quad (4)$$

Здесь S_0 — угловой спектр в некоторой плоскости $z = z_0$, параллельной излучателю и расположенной перед ним, α_1, α_2 — коэффициенты поглощения волны на частоте ω в воде и исследуемой пластине соответственно, $k_1 = \frac{\omega}{c_1}, k_2 = \frac{\omega}{c_2}$ — волновые числа в воде и материале, c_1, c_2 — скорость звука на частоте ω в жидкости и в исследуемом материале соответствен-

но, $T_{1,2} = \frac{2Z_{2,1}}{Z_{1,2} + Z_{2,1}}, Z_{1,2} = \frac{\rho_{1,2} c_{1,2}}{\cos \varphi_{1,2}}$ — коэффициенты прохождения продольной плоской монохроматической волны через границу раздела жидкость-материал, материал-жидкость при углах падения φ_1 , соответствующим данным k_x, k_y [8].

Падающая на поверхность твердого тела продольная волна генерирует кроме продольной также и попереч-

ную волну. При нормальном падении волны, поперечная волна в твердом теле не возбуждается. Нормальное прохождение плоской волны через бесконечный слой может быть реализовано путём выделения перпендикулярной составляющей углового спектра реального волнового пучка. В таком случае появляется возможность рассчитать параметры поперечной волны в твердом теле, так как иначе не представляется возможным разделить поперечную и продольную волны, не используя слой большой толщины.

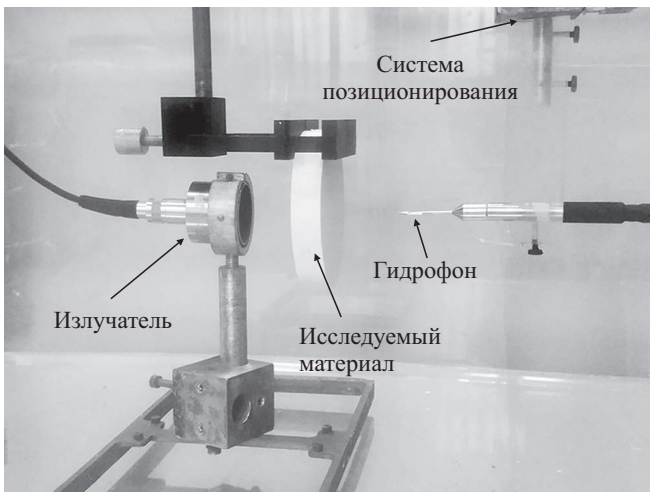


Рис. 1: Экспериментальная установка

В работе были исследованы плоскопараллельные образцы различной толщины (18.95 мм и 30 мм) в виде дисков диаметром 196 мм, изготовленные из оргстекла. Экспериментальная установка изображена на рис. 1. Широкополосный фокусированный излучатель (V392, Panametric, USA) с центральной частотой $f_0 = 1$ МГц, апертурой $D = 38.1$ мм и фокусным расстоянием $F = 63.5$ мм был помещен в предварительно дегазированную воду. Измерения проводились игольчатым гидрофоном HNA-0400, Onda, USA с диаметром чувствительного элемента 0.4 мм. Излучатель возбуждался коротким импульсом с частотой заполнения f_0 длиной 3 периода. Спектр генерируемого импульса достаточно широкий, что позволяет получать зависимости искомых параметров (скорости звука и коэффициента поглощения) от частоты в широкой полосе при однократном измерении. Для определения углового спектра пучка была измерена голограмма с подобранными согласно работе [5] для данной геометрии размером и шагом в воде. Измерения голограммы были проведены как с исследуемыми слоями, помещенными поперек акустической оси между излучателем и плоскостью измерения, так и без них. Измерения проводились на параллельной излучателю плоскости размером $L_x = L_y = 70$ мм с помощью указанных гидрофонов. Гидрофон перемещался системой позициониро-

вания (UMS-3, Precision Acoustics, UK) в плоскости $z = z_H$ с шагом $dx = dy = 0.5$ мм, что обеспечивало пространственную разрешимость волны в воде до частоты 1.5 МГц для плоской волны, распространяющейся параллельно плоскости голограммы. Плоскость измерения находилась за фокусом преобразователя на расстоянии $H = 73.5$ мм от центральной точки поверхности преобразователя.

Излучатель, материал и плоскость измерения были выставлены приблизительно параллельно (с точностью до 2 градусов в горизонтальной и вертикальной плоскостях). Важно отметить, что при использовании данного подхода точное соблюдение параллельности и соосности акустической и механических осей системы сканирования не требуется, так как измеряется полный угловой спектр, содержащий информацию о всех излучаемых и распространяющихся плоских волнах.

Запись сигнала на оси и на поверхности голограммы проводилась в импульсном режиме работы преобразователя. Сигнал записывался с помощью осциллографа (Tektronix TDS5034B). Импульс подбирался таким образом, чтобы его пространственная длина была меньше удвоенной толщины слоя во избежание перекрытия прошедшего через слой импульса с переотраженным от границ раздела. Временное окно было подобрано таким образом, чтобы в его пределы для каждой точки голограммы полностью попадал сигнал, однократно прошедший через поглощающий слой, при этом сигналы, отраженные от элементов экспериментальной установки и переотраженные внутри исследуемого слоя, не попадали в пределы измеряемого окна. Временное окно во всех измерениях выбиралось одинаковым длительностью $T = 40$ мкс и шагом по времени $dt = 8$ нс. В каждой точке голограммы накапливалось 64 кадра для усреднения сигнала. Сигнал был умножен на окно, сглаженное на краях и переходящее в ноль, тем самым уменьшался уровень спектрального шума, вызванного возможным скачком сигнала на краю окна. Далее сигнал дополнялся нулями на краях для интерполяции на более мелкий частотный масштаб, после чего осуществлялось время-частотное преобразование Фурье сигнала в каждой точке голограммы. Последующая обработка проводилась для каждой спектральной компоненты отдельно.

Рассчитанные одночастотные голограммы симметрично дополнялись нулями в пространственной области по направлениям x и y для интерполяции углового спектра на более мелкий масштаб по пространственным частотам, что позволяло более точно определить нормальную к слою плоскую волну. После этого выполнялось двумерное преобразование Фурье монохроматических голограмм, измеренных со слоем и без, и на заключительном этапе рассчитывалось их отношение. Из формул (3), (4) можно получить выражение для данного отношения $R(k_x, k_y, \omega)$, которое имеет вид:

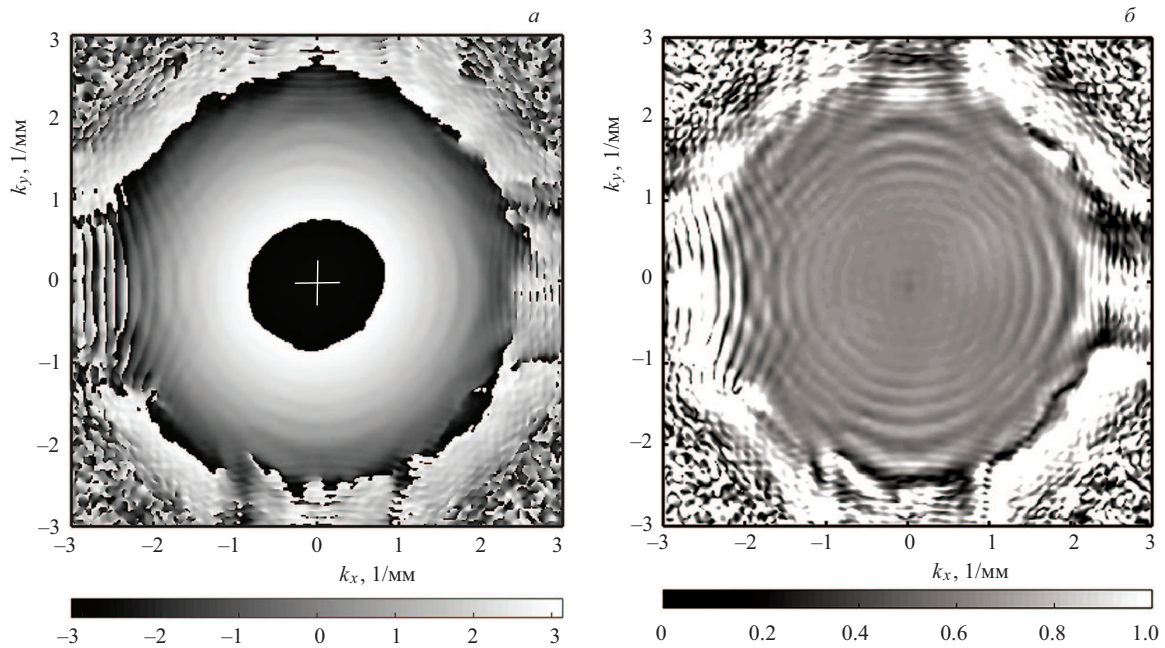


Рис. 2: Фаза (а) и амплитуда (б) отношения угловых спектров $R(k_x, k_y, \omega)$, рассчитанных из голограмм, измеренных с помощью гидрофона HNA-0400. Эллипс на рисунке (а) указывает на кривую постоянной фазы, пространственные частоты k_x, k_y центра данного эллипса, показанные точкой, соответствуют нормальной плоской волне

$$R(k_x, k_y, \omega) = \frac{s_2(k_x, k_y, \omega)}{s_1(k_x, k_y, \omega)} = e^{-ih(\sqrt{(k_1+i\alpha_1)^2-k_\perp^2})+ih(\sqrt{(k_2+i\alpha_2)^2-k_\perp^2})} T_{12}T_{21}. \quad (5)$$

Фаза соотношения (5) содержит информацию о скорости звука в материале слоя в диапазоне частот работы излучателя. Предполагая, что поглощение мало

на масштабе длины волны, получим зависимость скорости звука в материале в зависимости от частоты:

$$c_2(\omega) = \omega * \left(\left(\frac{\text{Arg}(R(k_x, k_y, \omega))}{h} + \sqrt{k_1(\omega)^2 - k_\perp^2} \right)^2 + k_\perp^2 \right)^{-1/2}. \quad (6)$$

При расчете скорости звука необходимо оценить полную разницу фаз с точностью до целого значения 2π по задержке импульса при прохождении в воде при наличии поглощающего слоя и без. Данное значение далее корректируется с помощью рассчитанной из отношения угловых спектров фазы, таким образом полная фаза отношения (5) будет определяться как $\text{Arg}(R(k_x, k_y, \omega)) = 2\pi N + \arg(R)$.

Для определения угла падения каждой компоненты плоской волны в зависимости от частоты, сначала необходимо определить компоненты углового спектра k_{0x}, k_{0y} на основной частоте работы преобразователя

f_0 , которые соответствуют волне, падающей нормально поверхности. Для этого определяется центр кривой постоянной фазы отношения (5) на частоте f_0 , плоская волна с такими компонентами k_x, k_y падает перпендикулярно слою (рис. 2, а). На основе этих значений рассчитываются углы $\varphi_x^0 = \frac{k_{0x}}{k_1^0}, \varphi_y^0 = \frac{k_{0y}}{k_1^0}$, далее по этим значениям можно определить значения пространственных частот k_{0x}, k_{0y} ортогональной волны для остальных временных частот. Угол падения плоской волны с компонентами k_x, k_y рассчитывается в приближении малых углов падения следующим образом:

$$\varphi \approx \frac{\left((k_x - k_{0x})^2 + (k_y - k_{0y})^2 \right)^{1/2}}{k_1}.$$

Модуль соотношения (5) содержит информацию

$$\alpha_2(\omega; k_x, k_y) = \left(\frac{-\ln(|R(k_x, k_y, \omega)| / (T_{12}T_{21}))}{h} + \alpha_1(\omega) / \sqrt{1 - \frac{k_{\perp}^2}{k_1^2}} \right) \sqrt{1 - \frac{k_{\perp}^2}{k_2^2}}. \quad (7)$$

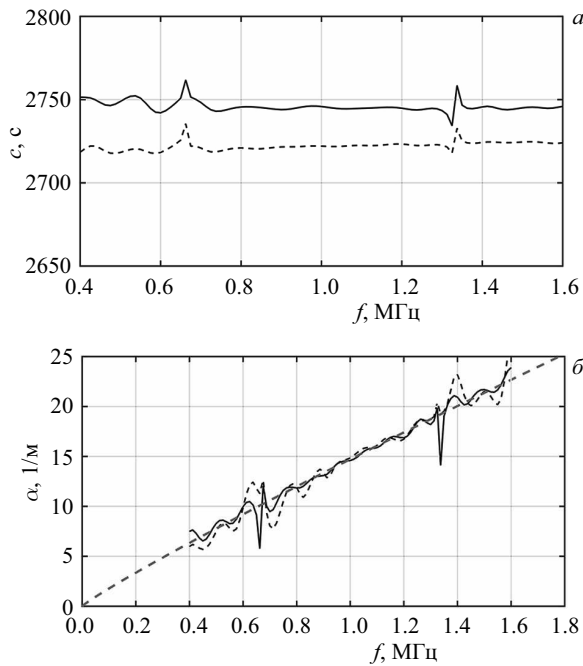


Рис. 3: Частотные зависимости скорости звука (а) и коэффициента поглощения (б) в оргстекле плоской продольной акустической волны, падающей нормально к образцу, полученные при измерении на слоях различной толщины (18.95 мм — сплошные линии, 30 мм — штриховые линии)

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе проведены измерения с помощью гидрофонов HNA-0400 с исследуемыми слоями различной толщины. На рис. 2 изображены фаза и амплитуда отношения (5), полученной с помощью измеренных голограмм. При известных скорости звука и плотности воды, плотности исследуемого материала и рассчитанной по формуле (6) скорости звука в материале, возможно вычислить коэффициенты пропускания T_{12} , T_{21} плоских волн, падающих под известными углами на границу раздела вода-материал.

о коэффициенте поглощения волны в материале в зависимости от частоты. В приближении слабого поглощения из уравнения (3) определяется зависимость поглощения от частоты в виде:

Для расчета параметров поглощающего слоя выбраны пространственные частоты, соответствующие нормальной плоской волне. Для данной волны вычислен коэффициент прохождения через границу раздела жидкость-материал и материал-жидкость. С помощью формул (6), (7) получены зависимости скорости звука и поглощения в исследуемом материале от частоты. На рис. 3 изображены полученные таким образом частотные зависимости скорости звука и поглощения в оргстекле.

Зависимость поглощения от частоты в материале наиболее точно аппроксимируется следующей функцией $\alpha_2(f) = af^b$, $a = 14.71$, $b = 0.92$, f в МГц. Важно отметить, что небольшое отличие в значениях скорости звука в материале при измерениях со слоями различной толщины связано с тем, что температура помещения и воды при разных экспериментах различалась в пределах $1 - 2^\circ\text{C}$. Выбросы на графике поглощения (рис. 3, б) связаны с тем, что спектр сигнала с прямоугольной огибающей в данных точках уменьшается до нулевого значения.

В текущих измерениях выбран фокусирующий излучатель, который при использовании предлагаемого подхода имеет ряд преимуществ перед плоскими УЗ излучателями. Во-первых, фокусированный УЗ пучок обладает достаточно широким угловым спектром. На практике это означает, что можно найти такую угловую компоненту, которая будет падать перпендикулярно образцу даже при неизбежных отклонениях во взаимной ориентации излучателя и исследуемого слоя при их установке и при этом будет иметь достаточно большую спектральную мощность. Во-вторых, при использовании фокусирующего излучателя, можно использовать образцы небольшого объема, помещая их в фокальную область таким образом, чтобы практически вся акустическая энергия проходила через образец. Тем самым небольшой исследуемый образец, помещенный в фокус, становится аналогичен более протяженному образцу, помещенному в область, где энергия акустического поля распределена по большей поперечной площади. В-третьих, при использовании фокусирующего излучателя можно уменьшить размер го-

лограммы, таким образом уменьшив время сканирования, что также способствует уменьшению систематической ошибки, вносимой изменением температуры воды и образца во время эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен новый метод измерения акустических характеристик твердых материалов в широкой спектральной полосе. Возможность измерения с помощью небольших образцов является решающим

фактором в случае невозможности создания протяженных плоскопараллельных образцов некоторых материалов, в том числе биологических тканей. При использовании данного способа нет необходимости использовать плосковолновое приближение, что может являться источником значительных ошибок, в то время как плоские волны выделяются из реальной неоднородной структуры поля с помощью голографического сканирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-02-00991 и 19-32-90022.

-
- [1] Хилл К., Бэмбер Дж., Хаар тер Г. Ультразвук в медицине. Перевод с англ. под. ред. Гаврилова Л.Р., Сапожникова О.А., Хохловой В.А. Физические основы применения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008, С. 544.
- [2] Raully H., Schwan H.P. // J. Acoust. Soc. Am. 1971. **50**, 692.
- [3] Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979.
- [4] Сапожников О.А., Пищальников Ю.А., Морозов А.В. // Акустический журнал. 2003. **49**, № 3. С. 416.
- [5] Sapozhnikov O. A., Tsysar S. A., Khokhlova V. A., Kreider W. // Journal of the Acoustical Society of America. 2015. **138**, N. 3. P. 1515.
- [6] Сапожников О.А., Пономарев А.Е., Смагин М.А. // Акустический журнал. 2006. **52**, № 3. С. 385.
- [7] Юлдашев П.В., Хохлова В.А. // Акустический журнал. 2011, **57**, № 3, С. 337.
- [8] Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.

Determination of characteristics of absorbing layers using acoustic holography

D. A. Nikolaev^a, S. A. Tsysar, V. A. Khokhlova, O. A. Sapozhnikov

Department of Photonics and Microwave Physics, Faculty of Physics Moscow state University
Moscow, 119991, Russia

E-mail: ^ada.nikolaev@physics.msu.ru

In many applications, including medical, it is necessary to know with high accuracy the acoustic characteristics of solid materials, such as the speed and absorption of elastic waves. This work is devoted to the experimental determination of the acoustic parameters of the medium using the plane-wave components of the angular spectrum of the ultrasonic beam obtained by acoustic holography. The method was tested in the characterization of solid-state materials. It is shown that the proposed method allows to measure with high accuracy the speed of sound and the absorption coefficient of longitudinal waves in a wide frequency range.

PACS: 43.58.-e

Keywords: acoustic holography, angular spectrum, plane waves, characterization of materials, ultrasonic transducers.

Received 15 November 2019.

Сведения об авторах

1. Николаев Дмитрий Александрович — аспирант; e-mail: da.nikolaev@physics.msu.ru.
2. Цысарь Сергей Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: sergey@acs366.phys.msu.ru.
3. Хохлова Вера Александровна — доктор физ.-мат наук, доцент; e-mail: vera@acs366.phys.msu.ru.
4. Сапожников Олег Анатольевич — доктор физ.-мат наук, профессор; e-mail: oleg@acs366.phys.msu.ru.