

Изучение частотных характеристик звукопоглощающих материалов методом импедансной трубы

А. А. Белоус,^{*} А. В. Шанин,[†] А. И. Корольков[‡]

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

При помощи простого метода акустического интерферометра исследованы два материала, соответствующих моделям пористых сред с жестким неподвижным и упругим подвижным каркасом, а также материал из тонких трубочек, поглощающий звук за счет вязкости, также получено теоретическое описание этих материалов.

PACS: 43 УДК: 393.7

Ключевые слова: импедансная труба, звукопоглощение, пористые среды.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе исследованы два материала, соответствующих моделям пористых сред с жестким и упругим каркасом, а также материал из трубочек, поглощающий звук за счет вязкости.

1. ИНТЕРФЕРОМЕТР

Построенный интерферометр представляет собой металлическую трубу квадратного внутреннего сечения 8×8 см и длиной 120 см. В трубу вставлены два одинаковых микрофона, расстояние между которыми 6 см. Труба закрывается с одного конца динамиком, а с другого — поршнем, представляющим собой жесткую стенку. Приблизительный рабочий диапазон трубы 150–2100 Гц.

2. ПОРИСТЫЙ МАТЕРИАЛ С ЖЕСТКИМ КАРКАСОМ

В качестве исследуемого образца был выбран материал Soundec, представляющий собой панель из древесных опилок, соединенных цементным раствором. Материал помещался в трубу вплотную к жесткой стенке, снималась частотная зависимость коэффициента отражения при помощи метода двух микрофонов [1] (рис. 1б). Для теоретического описания данного материала была выбрана модель Морзе–Ингарда [2]. Пусть давление в среде p и колебательная скорость u подчиняются системе уравнений

$$\begin{aligned} \rho_0 \frac{T}{\Omega} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\Phi u - \nabla p, \\ \frac{\Omega}{c_0^2} \frac{\partial p}{\partial t} &= -\rho_0 \nabla u, \end{aligned} \quad (1)$$

где Φ — сопротивление потоку ($\text{кг/м}^3\text{с}$), Ω — пористость, T — извилистость, c_0 — скорость звука в воздухе, ρ_0 — равновесная плотность воздуха. Из системы находится модуль волнового вектора в таком материале и коэффициент отражения от материала. Далее, подбирая значения параметров пористой среды, будем добиваться максимального соответствия экспериментальной и теоретической кривых. Наилучшее соответствие было достигнуто при $T = 4.15$, $\Omega = 0.75$, $\Phi = 42500$ (рис. 1б).

3. ПОРИСТЫЙ МАТЕРИАЛ С УПРУГИМ КАРКАСОМ

В качестве образца такого материала был выбран вспененный меламин Basotect (рис. 2а). Меламин также помещался в трубу перед жесткой стенкой, затем при помощи метода двух микрофонов снималась частотная зависимость коэффициента отражения.

Пористые материалы с упругим подвижным каркасом описываются более сложной моделью Био [3, 4], учитывающей не только движение воздуха в порах, но и движение самого материала. Записывается связь деформаций и напряжений, содержащая в качестве переменных смещение каркаса и воздуха в порах, затем из нее выводятся волновые уравнения, составляется характеристическое уравнение, находятся волновые числа для распространяющихся в пористой среде волн [3, гл. 6].

Модель Био описывает три распространяющиеся волны: две продольные и одну поперечную [4]. Коэффициент отражения в данной работе вычислялся только для продольных волн.

Аналогично эксперименту с Soundec, был вычислен коэффициент отражения от материала, помещенного на жесткую стенку, а затем путем подбора параметров была получена теоретическая кривая, наиболее близкая к экспериментальной (рис. 2б). Соответствие достигается при следующих параметрах модели: $\Phi = 12 \times 10^3$; $\Omega = 0.99$; $T = 1.01$.

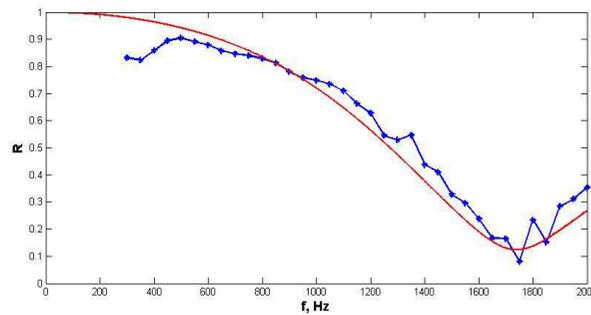
*E-mail: artem.belous@gmail.com

†E-mail: andrey_shanin@mail.ru

‡E-mail: korolkov@physics.msu.ru



a

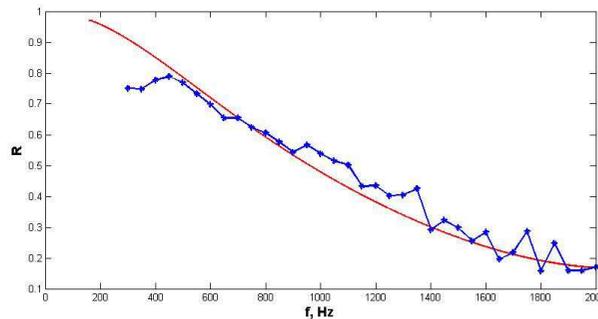


б

Рис. 1: *a* — Фотография материала Soundec; *б* — частотная зависимость коэффициента отражения; синяя линия — эксперимент, красная — теория



a



б

Рис. 2: *a* — Фотография меламина Basotect; *б* — частотная зависимость коэффициента отражения; синяя линия — эксперимент, красная — теория Био

4. МАТЕРИАЛ С ВЯЗКОСТЬЮ ИЗ ТОНКИХ ТРУБОЧЕК

В дополнение к коммерческим материалам был исследован материал, изготовленный авторами. Материал представляет собой набор скрепленных по длине трубочек из ПВХ длиной 21 см и диаметром 3 мм каждая (рис. 3а). Набор помещался в импедансную трубу перед закрытым концом, измерялся коэффициент отражения.

Будем считать, что течение воздуха по трубкам проходит с пограничным слоем. Толщина пограничного слоя оценивается как $\delta = 5\sqrt{\nu/\omega}$ [5]. Пусть есть два сорта трубочек: сами трубочки и зазоры между ними. Также будем считать, что трубочки к жесткой стенке прилегают неплотно, и трубочки первого и второго сорта обмениваются воздухом перед стенкой. В трубочках действует диссипативная сила $F = -\gamma v$. Тогда имеем систему уравнений

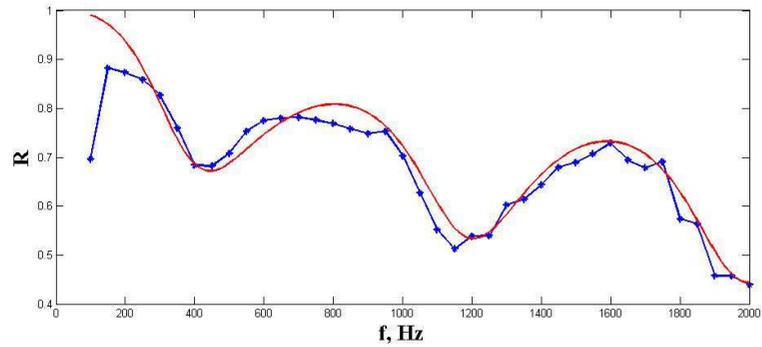
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho'}{\partial t} = -\rho_0 c_0^2 \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} - \gamma v \\ p_0(-h) = p_1(-h) = p_2(-h) \\ u_0(-h) S_0 = u_1(-h) S_1 + u_2(-h) S_2 \\ p_1(0) = p_2(0) \\ S_1 u_1(0) + S_2 u_2(0) = 0 \end{array} \right. ,$$

где γ — коэффициент трения, $p_1, p_2, v_1, v_2, S_1, S_2$ — давление, скорости в трубках первого и второго сортов и их площади, h — длина трубочек, $x = 0$ соответствует жесткой стенке, $x = -h$ соответствует переднему торцу.

Пользуясь выражением для силы трения при течении между двумя пластинами, из которых одна покоится, а другая движется со скоростью $vF = \eta S v/d$, где η — вязкость, S — площадь пластины, d — расстояние между ними [4], можем оценить силу трения на длине dx как $f = \frac{4d\eta v}{\delta} dx$, где d — диаметр трубочки. Тогда $\rho\gamma = 4\eta/d\delta$, и $\gamma = 4\nu/(\delta d)$. Сделав преобразование Фурье, получим выражение для волнового числа в тру-



а



б

Рис. 3: а — Фотография изготовленного материала; б — частотная зависимость коэффициента отражения; синяя линия — эксперимент, красная — теория

бочках: $k = k_0 \left(1 + \frac{2i\delta}{d} \right)$. Решив систему уравнений, получим коэффициент отражения для такого материала, который близок к измеренному (рис. 3б).

Таким образом, простыми средствами было проведено описание существующих материалов, а также созданного модельного материала.

- [1] Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973.
 [2] Morse P.M., Ingard K.U. Theoretical Acoustics. NY: McGraw-Hill, 1968.
 [3] Allard J.F., Atalla N. Propagation of Sound in Porous Media, Modelling Sound Absorbing Materials. Second

- Edition. John Wiley & Sons, UK, 2009.
 [4] Biot M.A. J. Acoust. Soc. Am. **28**. P.168. (1956).
 [5] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1988.

Studying frequency characteristics of sound absorbing materials using impedance tube method

A. A. Belous^a, A. V. Shanin^b, A. I. Korolkov^c

Department of Acoustics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
 E-mail: ^aartem.belous@gmail.com, ^bandrey_shanin@mail.ru, ^ckorolkov@physics.msu.ru

Two commercial sound absorbing materials and also a material made of thin tubes absorbing sound due to viscosity are studied using a simple method of acoustical interferometer and a theoretical description of these materials is also made.

PACS: 43

Keywords: impedance tube, sound absorbing, porous media.

Сведения об авторах

1. Белоус Артем Андреевич, аспирант; e-mail: artem.belous@gmail.com.
2. Шанин Андрей Владимирович — доктор физ.-мат. наук, доцент; тел. (495) 939-30-81, e-mail: andrey_shanin@mail.ru.
3. Корольков Андрей Игоревич — ведущий программист; тел. (495) 939-30-81, e-mail: korolkov@physics.msu.ru.