

МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ В ИМПЕДАНСНОЙ ТРУБЕ

Кожушко В.В., Сергиенко В.П., Бухаров С.Н., Тулейка А.С.

Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого
г. Гомель, Беларусь, E-mail: kozhushko@laser-ultrasound.com

Для решения задач расчёта звукопоглощения и звукоизоляции требуется определение акустических свойств материалов, используемых в конструкциях [1, 2]. Свойства материалов описываются постоянной распространения и акустическим импедансом. Акустические характеристики выражаются комплексными числами, которые описывают изменение амплитуды и фазы волн при распространении в материале. Характеристики зависят от плотности волокнистого материала и изменяются с частотой звука [2, 3], что требует экспериментального определения их значений. Измеренные характеристики используются для проведения предварительных расчётов звукопоглощающих и звукоизолирующих слоистых конструкций, содержащих материалы, характеристики которых известны.

Цель работы – применение известных методик, разработанных для измерения акустических характеристик материалов с помощью интерферометра, для определения свойств по результатам измерения в импедансной трубе. Волновое сопротивление волокнистых материалов принято выражать в относительных единицах волнового сопротивления воздуха, следующим образом: $W = W_a + jW_b$, где W_a – действительная, W_b – мнимая часть сопротивления. Волновое сопротивление воздуха $W_0 = \rho c_0$ имеет размерность кг/(м² с), где ρ – плотность воздуха и c_0 – скорость звука, которые зависят от температуры. Постоянная распространения имеет размерность обратную единице длины 1/см и может быть записана как $\gamma = \alpha + j\beta$, где α описывает затухание звука в материале с глубиной, $\beta = 2\pi f / v$ – волновое число, определяющее фазу звуковой волны, имеющей частоту f Гц и распространяющуюся со скоростью v м/с.

Измерение акустических постоянных проводится в интерферометре или импедансной трубе. Изначально разрабатывались методики измерения постоянных для акустического интерферометра, что требовало определения положения первого минимума сигнала в стоячей волне и отношения максимума и минимума сигнала для установленной частоты. Современные средства измерений позволяют определять акустические характеристики в широкой полосе частот, что значительно сужает доверительный интервал, поскольку принимается во внимание факт непрерывности характеристик и их плавное изменение с частотой [2]. Труба Кнудта – это металлическая или стеклянная труба, диаметр и длина которой подбираются в соответствии с требуемым частотным диапазоном. Набор труб Brüel&Kjær позволяет проводить измерения в двух диапазонах: от 50 до 1600 Гц и от 500 до 6400 Гц. С одной стороны трубы помещается металлический поршень, импеданс которого значительно превышает импеданс воздуха, с другой расположен громкоговоритель. Образец поглощающего материала размещается вблизи поршня, что позволяет реализовать условия характерные для жёсткой акустической границы. Электрический сигнал генератора подаётся на динамик, который возбуждает в трубе стоячие акустические волны в широкой полосе частот. Регистрация выполняется двумя микрофонами. Полученные в эксперименте сигналы позволяют рассчитать входной акустический импеданс и нормальный коэффициент поглощения звука в широкой полосе частот. В общем случае акустические характеристики материала получаются по результатам двух измерений из решения системы следующих уравнений:

$$\begin{cases} Z_1 = W \operatorname{cth}(\gamma L), \\ Z_2 = W \frac{W + Z_0 \operatorname{cth}(\gamma L)}{Z_0 + W \operatorname{cth}(\gamma L)} \end{cases} \quad (1)$$

где Z_1 – безразмерный акустический импеданс слоя толщиной L , размещённого у жёсткой акустической стенки, Z_2 – безразмерный акустический импеданс того же слоя, расположенного перед слоем материала, входной импеданс которого равен Z_0 .

Известны три способа определения акустических характеристик звукопоглощающих материалов. Первый способ основан на измерении входного акустического импеданса Z_1 материала толщиной L , и импеданса Z_2 слоя толщиной, также расположенного непосредственно у жёсткой акустической стенки, в этом случае импеданс $Z_0 = Z_1$. Во втором способе после измерения входного импеданса слоя толщиной L , материал размещается на расстояние d от жёсткой стенки, в этом случае $Z_0 = -j \operatorname{ctg} \alpha d$ где c_0 – скорость звука в воздухе. В третьем способе

устанавливается расстояние между материалом и жёсткой стенкой $d = c_0 / 4f$, равное четверти длины акустической волны в воздухе и, соответственно, входной акустический импеданс $Z_0 = 0$, входной импеданс $Z_2 = W \operatorname{th}(\gamma L)$, откуда волновое сопротивление материала $W = \sqrt{Z_1 Z_2}$. Выражения для волнового сопротивления в первом и втором способе получаются из системы (1), с использованием выражений для гиперболических функций двойного угла. Так как третий способ может быть реализован только для конкретной частоты, то он представляет собой частный случай измерений в импедансной трубе вторым способом.

С практической точки зрения, в диапазоне частот 50 – 250 Гц измерения, проводимые первым способом, требуют значительного количества исследуемого материала, так как оптимальная толщина звукопоглощающих материалов, имеющих незначительное звукопоглощение в данной полосе, достигает десятков сантиметров. Второй и третий способ не требуют удвоения толщины исследуемого материала. Однако для набора статистики и определения ошибки измерений желательно сопоставлять результаты измерений, выполненных различными способами. Кроме того, следует учитывать, что акустические постоянные материалов медленно изменяются с частотой. Так, например, известно, что волновое сопротивление изменяется обратно пропорционально, в то время как постоянная распространения

имеет зависимость пропорциональную \sqrt{f} [2], что справедливо для большинства волокнистых материалов.

Полученные в эксперименте значения комплексного входного импеданса Z_2 для слоя материала толщиной L , размещённого у жёсткой акустической стенки, и импеданс Z_1 для слоя удвоенной толщины были использованы для определения комплексной постоянной распространения. Определив комплексную постоянную распространения, можно рассчитать комплексное сопротивление материала [3]. Ниже приведены выражения для волнового сопротивления материала, связанные с измеренными акустическими импедансами. В результате двух измерений получаются выражения для акустического импеданса материалов следующего вида:

$$W = \frac{Z_1}{Z_0 \operatorname{cth}(\gamma L)}, \quad W = \frac{Z_2}{Z_0 \operatorname{cth}(2\gamma L)}. \quad (2)$$

Исключив из данных уравнений W , после несложных тригонометрических преобразований, можно выразить произведение постоянной распространения и толщины материала. Так как постоянная распространения является комплексной величиной, то определение её мнимой части приводит к неоднозначности, что

решается с учётом требований выполнения условий непрерывности и медленного изменения значения постоянной распространения пропорционально квадратному корню частоты:

$$\gamma L = \frac{1}{2} \operatorname{arch} \left(\frac{U_2}{U_1 - U_2} \right) + i \frac{\pi}{2} n, \quad (3)$$

где n – целое число, определяемое из условий непрерывности и медленного изменения величин в измеряемом диапазоне частот. Аналогичным образом выражается произведение для второго способа измерения.

Методика была использована для измерения комплексных акустических величин звукопоглощающих материалов на основе каменной ваты. На рисунке 1 представлены образцы материалов из каменной ваты плотностью 60, 80 и 110 кг/м³, которые были использованы в большой и малой импедансной трубе. По результатам экспериментов составлены таблицы свойств на октавных частотах от 250 до 6400 Гц.



Рисунок 1 – Подготовленные образцы материалов из каменной ваты диаметром 100 мм и 29 мм. Плотность образцов слева направо 80 кг/м³, 60 кг/м³ и 110 кг/м³

В заключение отметим, что основные сложности применения методик связаны с проведением измерений в области частот менее 200 Гц, где поглощение материала незначительно, и решение поставленной задачи первым способом требует достаточное количество материала для определения входного импеданса слоя удвоенной толщины, поэтому предпочтительнее проводить измерения вторым способом. Расширенная неопределённость измерений методик составляет не более 10%. Для расчёта нормальных коэффициентов поглощения и звукоизоляции слоистых конструкций может быть использована программа, разработанная в ИММС НАН Беларуси [4].

Список литературы:

1. Utsuno, H. Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials/ H. Utsuno, T. Tanaka, T. Fujikawa, A. F. Seybert// J. Acoust. Soc. Am. – 1989. – V. 86, №2, – P. 637–643.
2. Руководство по измерению и расчёту акустических характеристик звукопоглощающих материалов/ НИИСФ Госстроя СССР // Москва 1979.
3. Kimura M. A new high-frequency impedance tube for measuring sound absorption coefficient and sound transmission loss./ M. Kimura, J. Kunio, A. Schuhmacher, Y. RYU//«inter.noise 2014» Melbourne, Australia, 2014. – P. 2–11.
4. Якимович, Н. В. Звукопоглощение композитов на основе льняного и полимерного волокна / Н. В. Якимович, А. С. Хмара, С. Н. Бухаров, В. П. Сергиенко, В. В. Кожушко // Композитные материалы – 2014. – т.8, №4.– С. 34–41.