

УДК 533.6.013.42

ОДНОТОЧЕЧНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ВОЛНОВОДАХ

А. В. КОРЖИК, В. Е. КОРЖИК

Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев

Получено 27.06.2007

Предложен метод измерения коэффициента отражения звукопоглощающих акустических материалов на низких частотах в заполненных водой волноводах. Он предполагает использование одного измерительного гидрофона – приемника колебательной скорости. Возбудитель акустических колебаний в волноводе выполнен в виде электроакустического шестиполосника. В измерительных установках, на основе предлагаемого метода, наличие приемника колебательной скорости позволяет скомпенсировать влияние колебаний стенок волновода. Как результат возрастают точность измерения расстояния между испытуемым объектом и гидрофоном, а также общая эксплуатационная надежность при работе в условиях высоких гидростатических давлений.

Запропоновано метод вимірювання низькочастотного коефіцієнта відбиття звукопоглинаючих акустичних матеріалів на низьких частотах у заповнених водою хвильоводах. Він передбачає використання одного вимірювального гідрофона – приймача коливної швидкості. Збудник акустичних коливань у хвильоводі має вигляд електроакустичного шестиполосника. В установках, побудованих на основі запропонованого методу, наявність приймача коливної швидкості дозволяє знівелювати вплив коливань стінок хвильоводу. Як наслідок збільшуються точність вимірювання відстані між обстежуваним об'єктом і гідрофоном, а також загальна експлуатаційна надійність при роботі в умовах високих гідростатичних тисків.

The paper deals with proposing the technique for measuring of the low-frequency reflection coefficient of sound-absorbing acoustic materials in water-filled waveguides. It implies use of a single hydrophone – vibration velocity sensor. The source of acoustic vibration in the waveguide has the form of an electroacoustic six-pole. Presence of the vibration velocity sensor in the devices developed on the basis of the proposed technique allows the compensation of waveguide's wall vibration. As a result, the accuracy of measurement of the distance between the tested object and the hydrophone increases, as well as total reliability when operating at high hydrostatic pressures.

ВВЕДЕНИЕ

Метод отыскания коэффициента отражения, при котором звуковое давление измеряется перемещающимся вдоль оси волновода приемником давления [1], разработан еще в 1913 г. Он прост и может использоваться как в воздушной, так и в водной среде. С точки зрения минимизации погрешности на низких частотах этот метод – наилучший. Однако трудности практической реализации измерительных установок, возникающие при работе с высокими гидростатическими давлениями, и связанные с необходимостью перемещения гидрофона, вынудили искать другие подходы. В последнее годы распространение получил так называемый двухточечный метод измерения коэффициента отражения (или поглощения) акустических материалов в волноводе, заполненном водой. При этом на концах волновода располагаются возбудитель и испытуемый объект [2, 3].

Указанный метод предполагает измерение акустического давления в двух точках на оси жесткого волновода на некоторых расстояниях от испытуемого (отражающего) объекта, замыкающего волновод [4]. Анализ звукового поля в такой

системе позволяет сформулировать два уравнения с двумя неизвестными – производительностью возбудителя акустических колебаний на одном конце волновода и коэффициентом отражения испытуемого объекта – на противоположном. Решение этих уравнений относительно коэффициента отражения составляет основу алгоритма определения искомой характеристики материала.

В ходе испытаний звуковое давление на оси волновода измеряется в двух точках неподвижными гидрофонами. Наличие сальниковых вводов кабелей измерительных гидрофонов вносит при высоких гидростатических давлениях существенный элемент ненадежности. В упомянутых установках в качестве измерительных датчиков используются приемники давления. Кроме того, в волноводе при работе возбудителя в воде, кроме аксиальных, неизбежно возникают радиальные колебания, обусловленные вибрацией стенок волновода, который нельзя считать абсолютно жестким. Колебания стенок неизбежно возникают и из-за механической связи с возбудителем.

В работе [5] рассмотрены способы снижения погрешности измерений, обусловленные радиальными колебаниями волновода. Показано также,

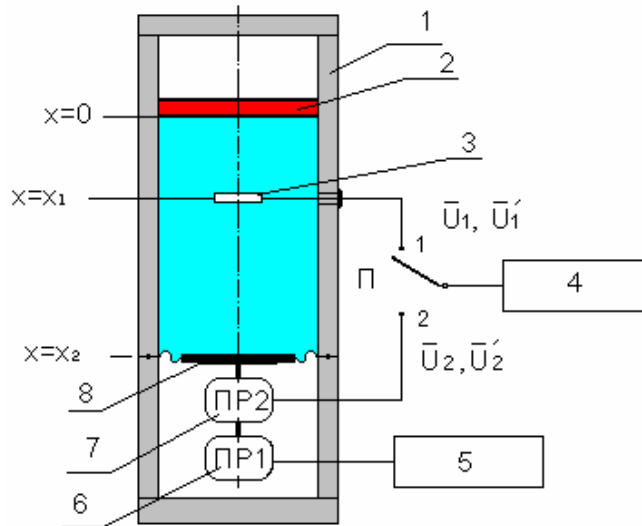


Рис. 1. Общая схема измерительной установки для определения коэффициента отражения акустических материалов одноточечным методом:

1 – волновод, 2 – испытуемый объект, 3 – измерительный гидрофон (приемник колебательной скорости), 4 – вольтметр, 5 – генератор, 6 – первый преобразователь (возбудитель), 7 – второй преобразователь, 8 – мембрана

что на отдельных частотах, соответствующих совпадению узлов давления стоячей волны в волноводе с местами расположения гидрофонов, определение коэффициента отражения может оказаться практически невозможным. Кроме того, вблизи этих критических частот погрешность измерений настолько велика, что результаты измерений следует считать недостоверными.

Предлагается метод измерения коэффициента отражения, в котором используется только один гидрофон и возбудитель колебаний в волноводе – электроакустический шестиполосник [6]. Измерительный гидрофон выполнен в виде приемника колебательной скорости (приемник градиента давления) – ПКС.

Использование только одного гидрофона дает возможность увеличить надежность конструкции измерительной установки при работе с высокими гидростатическими давлениями. Измерительный гидрофон в виде приемника колебательной скорости позволяет избавиться от помех, обусловленных вибрацией стенок волновода, так как его чувствительность в радиальном направлении практически равна нулю. Кроме того, ПКС, как правило, более надежен при работе при больших гидростатических давлениях, поскольку конструктивно его можно выполнить без воздушных полостей.

Применение приемника указанного типа позволяет более точно определять расстояние от

испытуемого объекта до гидрофона ПКС, так как воспринимающий элемент последнего обычно выполняется в виде тонкой пьезокерамической пластины, а абсолютная погрешность его установки не превышает половины толщины пластины. В приемниках же давления (со сферическим или цилиндрическим чувствительным элементом) акустический центр, как правило, не совпадает с геометрическим.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Устройство, возбуждающее акустические колебания в волноводе (рис. 1), представляет собой преобразователь-шестиполосник, имеющий два электрических ввода/вывода и один акустический. Один электрический ввод используется для подачи тока возбуждения. При работе преобразователя на волновод на втором электрическом выводе появляется сигнал \bar{U}_2 , пропорциональный объемной $V_{об}$ (и линейной v) колебательной скорости его излучающей поверхности S [6]:

$$\bar{U}_2 = M_2 V_{об} = M_2 S v.$$

Здесь M_2 – электроакустический коэффициент преобразования (постоянная величина). Конструктивно такой преобразователь можно выполнить составным из двух преобразователей ПР1 и ПР2

(например, из двух электродинамических вибростендов или электродинамического вибростенда и/или вибродатчика, жестко связанного с мембраной, излучающей в полость волновода).

Следует отметить, что в данном случае для возбуждения шестиполосника необходимым условием является отсутствие “электро-электрической” связи между электрическими вводами [6]. Это значит, что при заторможенной колебательной системе шестиполосника и подаче на один из входов напряжения на другом выходе напряжение должно отсутствовать. Для низких частот это условие легко выполнимо.

Как и в двухточечном методе, измерения проводятся в два этапа – с испытуемым образцом в волноводе и без него, когда на месте образца находится граница раздела воздух – вода.

Потенциал скоростей в волноводе примем в виде

$$\Phi = Ae^{-jkx} + Be^{jkx} = A(e^{-jkx} + Re^{jkx}). \quad (1)$$

Здесь A – комплексный коэффициент, характеризующий прямую волну в волноводе, пропорциональный излучающей способности возбуждителя колебаний; B – комплексный коэффициент, характеризующий волну, отраженную от границы раздела вода – испытуемый образец; k – волновое число; R – коэффициент отражения.

На первом этапе измерений определяются колебательные скорости на оси волновода при $x = x_1$ и $x = x_2$:

$$v_1 = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = jkA_1(e^{-jkx_1} - Re^{jkx_1}), \quad (2)$$

$$v_2 = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{x=x_2} = jkA_1(e^{-jkx_2} - Re^{jkx_2}), \quad (3)$$

где

$$R = \frac{B_1}{A_1}. \quad (4)$$

Отношение скоростей составляет

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{e^{-jkx_1} - Re^{jkx_1}}{e^{-jkx_2} - Re^{jkx_2}}. \quad (5)$$

Электрические напряжения \bar{U}_1 и \bar{U}_2 на выходе измерительного ПКС (он же ПР1) и преобразователя ПР2 (см. рис. 1) связаны с их чувствительностями $\gamma_{\text{ПКС}}$, $\gamma_{\text{ПР2}}$ и скоростями v_1 , v_2 соотношениями

$$\gamma_{\text{ПКС}} = \frac{\bar{U}_1}{v_1}, \quad \gamma_{\text{ПР2}} = \frac{\bar{U}_2}{v_2}. \quad (6)$$

Из уравнений (2)–(6) получим выражение для коэффициента отражения испытуемого объекта:

$$R = \frac{Ge^{-jkx_2} - e^{-jkx_1}}{Ge^{jkx_2} - e^{jkx_1}}. \quad (7)$$

Здесь

$$G = \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} \frac{\gamma_{\text{ПР2}}}{\gamma_{\text{ПКС}}}. \quad (8)$$

Как правило, в выражении (8) отношение чувствительностей преобразователя ПР2 $\gamma_{\text{ПР2}}$ и приемника колебательной скорости $\gamma_{\text{ПКС}}$ неизвестно и определяется экспериментально на втором этапе измерений. Часто это делается на измерительной установке при известной акустической нагрузке. При нагрузке в виде границы раздела вода – воздух [2, 3] коэффициент отражения с высокой точностью можно считать равным минус единице.

На втором этапе измеряют напряжения \bar{U}'_1 и \bar{U}'_2 , связанные со скоростями v'_1 и v'_2 при x_1 и x_2 :

$$\gamma_{\text{ПКС}} = \frac{\bar{U}'_1}{v'_1}, \quad \gamma_{\text{ПР2}} = \frac{\bar{U}'_2}{v'_2}. \quad (9)$$

При $R = -1$ из соотношения (5) следует

$$\frac{v'_1}{v'_2} = \frac{e^{-jkx_1} + e^{jkx_1}}{e^{-jkx_2} + e^{jkx_2}} = \frac{\cos(kx_1)}{\cos(kx_2)}. \quad (10)$$

Окончательно с учетом выражений (8)–(10) получаем

$$G = \frac{\bar{U}_1 \bar{U}'_2}{\bar{U}_2 \bar{U}'_1} \frac{\cos(kx_1)}{\cos(kx_2)}. \quad (11)$$

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2 схематически изображена возможная реализация измерительной установки для одноточечного измерения коэффициента отражения акустических материалов. В качестве ПР1 можно использовать малогабаритный вибростенд, а в качестве ПР2 – вибродатчик. Конструктивно возможны и другие схемы построения установки.

Перед проведением измерений определяют глубину погружения гидрофона-ПКС в волноводе x_1 и расстояние от испытуемого объекта до излучающей мембраны x_2 .

На первом этапе с помощью вольтметра и фазометра измеряются напряжения U_1 , U_2 и их фазовые сдвиги φ_1 , φ_2 относительно опорного напряжения (в данном случае, напряжения генератора).

На втором этапе (при отсутствии испытуемого объекта в волноводе) измеряются напряжения U'_1 , U'_2 и фазовые сдвиги φ'_1 , φ'_2 соответственно. В выражении (11) $\bar{U}_1 = U_1 e^{j\varphi_1}$, $\bar{U}_2 = U_2 e^{j\varphi_2}$, $\bar{U}'_1 = U'_1 e^{j\varphi'_1}$, $\bar{U}'_2 = U'_2 e^{j\varphi'_2}$ – напряжения и сдвиги фаз, измеряемые вольтметром и фазометром.

Коэффициент отражения подсчитывается по формуле (7), где числовой параметр определен как

$$G = \frac{U_1 U'_2}{U_2 U'_1} \frac{\cos(kx_1)}{\cos(kx_2)} e^{j(\varphi_1 - \varphi_2 + \varphi'_1 - \varphi'_2)}.$$

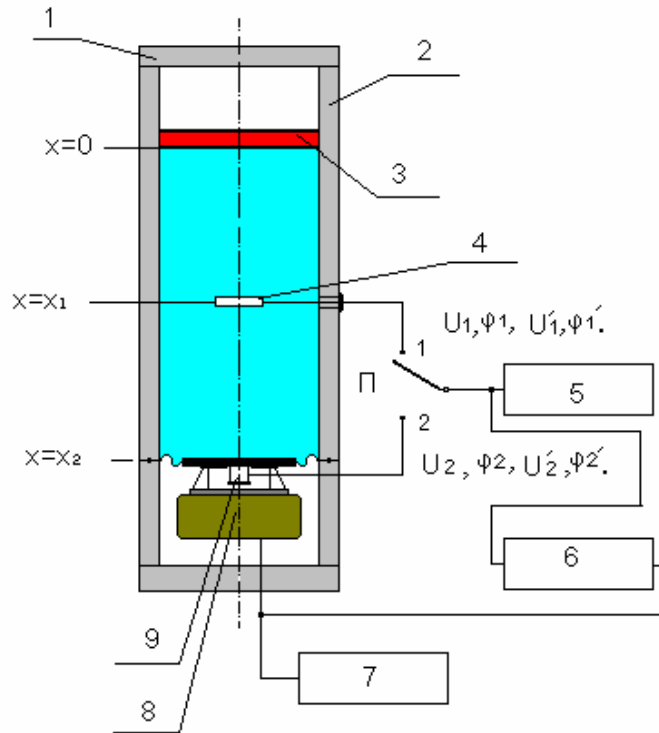


Рис. 2. Один из возможных вариантов реализации измерительной установки:

1 – крышка волновода, 2 – волновод, 3 – испытуемый объект,
4 – измерительный гидрофон (приемник колебательной скорости),
5 – вольтметр, 6 – фазометр, 7 – генератор, 8 – возбудитель, 9 – вибротатчик

Измерения на первом и втором этапах проводятся при одинаковых гидростатических давлениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый метод, реализованный в измерительных установках для определения коэффициента отражения, позволяет:

- сделать установки более надежными при работе с большими гидростатическими давлениями, так как имеют только один измерительный гидрофон в виде приемника градиента давления;
- устранить погрешность измерений, обусловленную радиальными колебаниями стенки волновода;
- более точно определять расстояние от испытуемого объекта до гидрофона;
- уменьшить длину волновода (по сравнению с установками с двумя гидрофонами) на отрезок, равный расстоянию между вторым гидрофоном и мембраной возбудителя колебаний.

зок, равный расстоянию между вторым гидрофоном и мембраной возбудителя колебаний.

1. Дрейзен И. Г. Курс электроакустики.– М.: Связьрадиоиздат, 1938.– 230 с.
2. Климов С. П., Тютюкин В. В., Вовк А. Е. Автоматизированный акустический интерферометр // Измер. техн.– 1989.– N 12.– С. 41–43.
3. Тютюкин В. В. О точности измерений характеристик материалов в акустической низкочастотной трубе // Акуст. ж.– 2002.– 47, N 6.– С. 843–852.
4. Русаков И. Г. Расчеты конструкции трубы для звуковых измерений в воде // Акустические и гидроакустические измерения.– М.: Стандарт ГИЗ, 1960.– С. 51–62.
5. Басовский В. Г., Вовк И. В., Лейко А. Г. О некоторых специфических погрешностях, возникающих при оценке коэффициента отражения звука методом двух гидрофонов в акустической трубе // Акуст. вісн.– 2005.– 8, N 1-2.– С. 1–15.
6. Коржик А. В., Коржик В. Е. Метод определения акустических характеристик материалов по реакции на возбудитель в волноводах, заполненных водой // Акуст. вісн.– 2007.– 10, N 4.– С. 52–58.