

УДК 533.6.013.42

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ПО РЕАКЦИИ НА ВОЗБУДИТЕЛЬ В ВОЛНОВОДАХ, ЗАПОЛНЕННЫХ ВОДОЙ

А. В. КОРЖИК, В. Е. КОРЖИК

Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев

Получено 04.06.2007

С использованием свойств электроакустического шестиполосника предложен метод измерения низкочастотных значений коэффициента отражения звукопоглощающих акустических материалов в волноводах, заполненных водой. В его основе – возможность контроля с акустической стороны за реакцией среды на шестиполосник, работающий в качестве возбудителя колебаний. В установках, использующих предлагаемый метод, в волноводе отсутствуют измерительные гидрофоны. Это увеличивает общую эксплуатационную надежность при работе на высоких гидростатических давлениях.

З використанням властивостей електроакустичного шестиполосника запропоновано метод вимірювання низькочастотних значень коефіцієнта відбиття акустичних матеріалів у хвилеводах, заповнених водою. У його основі – можливість контролю з акустичного боку за реакцією середовища на шестиполосник, який працює як збуджувач коливань. В установках, які використовують запропонований метод, у хвилеводі відсутні вимірювальні гідрофони. Це підвищує загальну експлуатаційну надійність при роботі на високих гідростатичних тисках.

Using the properties of electroacoustic six-pole, a technique is proposed for measuring low-frequency values of a reflection coefficient of materials in water-filled waveguides. It is based on the possibility to control on the part of acoustics the medium's reaction to the six-pole operating as a vibration actuator. For devices set using the proposed technique there are no measuring hydrophones in the waveguide. This leads to increasing reliability when working at high hydrostatic pressures.

### ВВЕДЕНИЕ

Существует ряд методов определения отражающих (поглощающих) характеристик акустических покрытий в волноводах, заполненных водой [1–3]. Все они предполагают измерение акустического давления в поле волновода между возбудителем колебаний и испытуемым объектом. Обычно используется один [3, 4] или два гидрофона [1, 2]. В случае измерений при повышенных гидростатических давлениях наличие сальниковых вводов гидрофонов и самих гидрофонов (приемников давления) может существенно снижать эксплуатационную надежность измерительных установок.

В связи с этим представляет интерес идея применения метода, основанного на реакции испытуемого объекта в волноводе на возбудитель акустических колебаний [4]. В измерительных установках, построенных с использованием этого принципа, отсутствуют такие элементы как гидрофоны и сальниковые кабельные вводы. Однако подобные методики предполагают достаточно громоздкий анализ характера входного электрического сопротивления возбудителя. Сами авторы пособия [4] указывают на практическую применимость метода, но отмечают трудности, связанные с особенностями настроечных процедур.

Ниже предлагается метод и схема измерительной установки в виде жесткого волновода, заполненного водой, в которой отсутствуют измерительные гидрофоны, а возбудитель акустических колебаний представляет собой электроакустический преобразователь-шестиполосник. Этот трехсторонний преобразователь имеет два электрических ввода/вывода и один акустический выход. Под акустическим выходом понимается колеблющаяся рабочая поверхность преобразователя, генерирующая звуковые колебания в волноводе. Один электрический ввод используется для подачи тока, возбуждающего акустические колебания. При работе преобразователя на волновод на втором электрическом выводе появляется сигнал, пропорциональный объемной скорости на рабочей поверхности и, наряду с током возбуждения, содержащий информацию об акустическом поле в волноводе. На практике такой преобразователь можно выполнить составным – из двух электро-механических преобразователей. К примеру, можно использовать два электродинамических вибростенда или электродинамический вибростенд и вибродатчик (пьезокерамический преобразователь), жестко связанный с его рабочей поверхностью, излучающей в полость волновода.

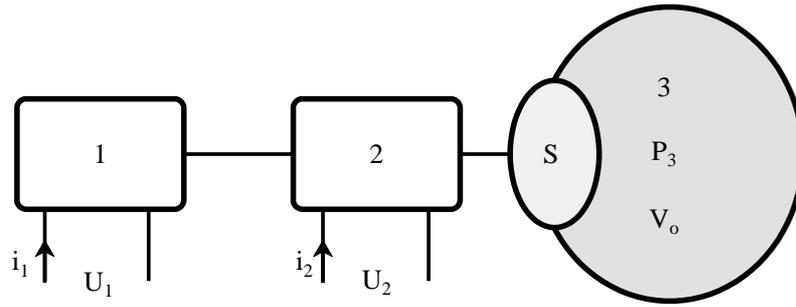


Рис. 1. Электроакустический шестиполосник:

1, 2, 3 – стороны шестиполосника,  
 $i_1, i_2, U_1, U_2$  – токи и напряжения на 1 и 2 (сторонах) входах шестиполосника,  
 $F_3, V_3$  – сила и скорость механического входа 3 шестиполосника

### 1. ТЕОРИЯ МЕТОДА

Следуя работе [5], получим уравнения взаимного преобразования для электромеханического шестиполосника, имеющего один механический и два электрических входа (рис. 1):

$$U_1 = Z_1 i_1 + N_1 i_2 + K_1 V_3, \quad (1)$$

$$U_2 = N_2 i_1 + Z_2 i_2 + K_2 V_3, \quad (2)$$

$$F_3 = -K_1 i_1 - K_2 i_2 + \mathfrak{Z}_{м3} V_3. \quad (3)$$

Здесь

$$Z_1 = \left( \frac{U_1}{i_1} \right)_{\substack{i_2=0 \\ V_3=0}} \quad \text{и} \quad Z_2 = \left( \frac{U_2}{i_2} \right)_{\substack{i_1=0 \\ V_3=0}} \quad -$$

электрические сопротивления входов 1 и 2 шестиполосника в режиме торможения механической стороны;

$$\mathfrak{Z}_{м3} = \left( \frac{F_3}{V_3} \right)_{\substack{i_1=0 \\ i_2=0}} \quad -$$

механическое сопротивление шестиполосника со стороны входа 3 в режиме холостого хода электрических входов 1 и 2;

$$K_1 = - \left( \frac{F_3}{i_1} \right)_{\substack{i_2=0 \\ V_3=0}} = \left( \frac{U_1}{V_3} \right)_{\substack{i_1=0 \\ i_2=0}} \quad -$$

коэффициент преобразования между входами 1 и 3;

$$K_2 = - \left( \frac{F_3}{i_2} \right)_{\substack{i_1=0 \\ V_3=0}} = \left( \frac{U_2}{V_3} \right)_{\substack{i_1=0 \\ i_2=0}} \quad -$$

коэффициент преобразования между входами 2 и 3;

$$N_1 = \left( \frac{U_1}{i_2} \right)_{\substack{i_1=0 \\ V_3=0}} \quad \text{и} \quad N_2 = \left( \frac{U_2}{i_1} \right)_{\substack{i_2=0 \\ V_3=0}} \quad -$$

коэффициенты преобразования между электрическими входами 1 и 2.

Используя уравнения преобразования, приведенные А. А. Харкевичем [6] для многостороннего преобразователя при числе внешних входов, равном трем, от уравнений (1)–(3) для электромеханического шестиполосника можно перейти к уравнениям взаимного преобразования электроакустического шестиполосника, см.рис. 1.

Давление  $P_3$  и объемная скорость поршня  $V_{об}$  связаны с толкающей силой  $F_3$  и линейной скоростью  $V_3$  соотношениями

$$P_3 = \frac{F_3}{S_{эф}}, \quad (4)$$

$$V_{об} = V_3 S_{эф}, \quad (5)$$

где  $S_{эф}$  – эффективная поверхность поршня, с помощью которого осуществляется излучение в рабочую полость волновода. Тогда

$$U_1 = Z_1 i_1 + N_1 i_2 + M_1 V_{об}, \quad (6)$$

$$U_2 = N_2 i_1 + Z_2 i_2 + M_2 V_{об}, \quad (7)$$

$$P_3 = -M_1 i_1 - M_2 i_2 + Z_{а3} V_{об}. \quad (8)$$

Здесь

$$M_1 = \frac{K_1}{S_{эф}} = \left( \frac{U_1}{V_{об}} \right)_{\substack{i_1=0 \\ i_2=0}} = - \left( \frac{P_3}{i_1} \right)_{\substack{i_2=0 \\ V_{об}=0}} \quad (9)$$

и

$$M_2 = \frac{K_2}{S_{\text{эф}}} = \left( \frac{U_2}{V_{\text{об}}} \right)_{\substack{u_1=0 \\ u_2=0}} = - \left( \frac{P_3}{i_2} \right)_{\substack{i_1=0 \\ V_{\text{об}}=0}} \quad (10)$$

обозначают электроакустические коэффициенты преобразования шестиполосника;

$$Z_{\text{а3}} = \frac{Z_{\text{м3}}}{S_{\text{эф}}^2} \quad (11)$$

акустическое сопротивление шестиполосника на поверхности  $S_{\text{эф}}$  возбуждителя.

Пусть только вход 1 шестиполосника (выбор произволен) служит для подачи тока возбуждения ( $i_1 \neq 0$ ) и в волноводе отсутствует посторонний источник давления ( $P_3=0$ ), а выход 2 используется для контроля объемной скорости излучающей поверхности шестиполосника ( $i_2=0$ ,  $U_2 \neq 0$ ). Положим также, что в шестиполоснике отсутствуют электро-электрические связи ( $N_1 = N_2 = 0$  – при заторможенной колебательной системе подача тока на один из входов не вызывает появления напряжения на другом входе). Для составной конструкции шестиполосника это условие легко выполняется посредством жесткой связи между подвижными элементами преобразователей.

С учетом сказанного уравнения (6)–(8) приобретают следующий вид:

$$U_1 = Z_1 i_1 + M_1 V_{\text{об}}, \quad (12)$$

$$U_2 = M_2 V_{\text{об}}, \quad (13)$$

$$i_1 = \frac{Z_{\text{а3}} V_{\text{об}}}{M_1}. \quad (14)$$

Необходимо иметь в виду, что величина  $Z_{\text{а3}}$  определяется сопротивлением механической колебательной системы шестиполосника  $Z_0$ , а также сопротивлением реакции волновода с водой и испытуемым объектом  $Z_3$ :

$$Z_{\text{а3}} = Z_0 + Z_3. \quad (15)$$

Для определения коэффициента отражения испытуемого объекта следует провести три опыта (рис. 2).

В первом из них измеряется отношение напряжения  $\bar{U}_2$  на выходе 2 к току возбуждения  $\bar{i}_1$  на входе 1. Из уравнений (13)–(15) следует, что

$$\frac{\bar{U}_2}{\bar{i}_1} = \frac{M_1 M_2}{Z_0 + Z_3}. \quad (16)$$

Акустическое сопротивление  $Z_3$  определяется отношением давления на поверхности излучающей поверхности возбуждителя в волноводе к ее объемной скорости. Определим величину  $Z_3$  для жесткого волновода, заполненного водой с испытуемым объектом.

Общий вид потенциала скорости для плоской волны записывается как

$$\varphi = Ae^{-jkx} + Be^{jkx} = A(e^{-jkx} + Re^{jkx}). \quad (17)$$

Здесь  $k = \omega/c$  – волновое число;  $\omega$  – круговая частота;  $c$  – скорость звука в среде;  $A$  и  $B$  – амплитуды падающей и отраженной волн;  $R = B/A$ .

Давление  $P_L$  при  $x=L$  будет

$$P_L = jk\rho c\varphi|_{x=L} = jk\rho cA_1(e^{-jkL} + Re^{jkL}), \quad (18)$$

где  $\rho$  – плотность воды. Объемная колебательная скорость поверхности  $S_{\text{эф}}$  при  $x=L$

$$V_{\text{об}} = - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \Big|_{x=L} S_{\text{эф}} = jkA_1 S_{\text{эф}}(e^{-jkL} - Re^{jkL}). \quad (19)$$

Здесь  $R = B_1/A_1$  – искомый коэффициент отражения;  $A_1$  и  $B_1$  – амплитуды падающей и отраженной волны в первом опыте. Тогда акустическое сопротивление  $Z_3$  приобретает вид

$$Z_3 = \frac{P_L}{V_{\text{об}}} = \frac{\rho c}{S_{\text{эф}}} \frac{e^{-jkL} + Re^{jkL}}{e^{-jkL} - Re^{jkL}}. \quad (20)$$

Так как в предлагаемом методе отсутствуют измерительные гидрофоны, можно обеспечить минимальную длину волновода, входящего в установку. Расстояние  $L$  должно быть таким, чтобы к испытуемому объекту приходила почти чисто плоская волна (без высших мод). На практике это условие выполняется при  $Lg(4 \div 5)D$ , где  $D$  – диаметр волновода.

Во втором опыте при отсутствии испытуемого объекта для границы раздела вода – воздух можно считать  $R = -1$ . В этом случае при высоте столба воды в волноводе  $L'$  имеем

$$Z'_3 = \frac{\rho c}{S_{\text{эф}}} \frac{e^{-jkL'} - e^{jkL'}}{e^{-jkL'} + e^{jkL'}} = \frac{\rho c}{S_{\text{эф}}} (-j \operatorname{tg}(kL')). \quad (21)$$

Здесь проводится измерение отношения напряжения  $\bar{U}'_2$  на выходе 2 к току возбуждения  $\bar{i}'_1$  на входе 1 шестиполосника. Из уравнений (13), (14) и (16) следует

$$\frac{\bar{U}'_2}{\bar{i}'_1} = \frac{M_1 M_2}{Z_0 + Z'_3}. \quad (22)$$

В третьем опыте при высоте столба воды в волноводе  $L''$  измеряется отношение напряжения  $\bar{U}''_2$

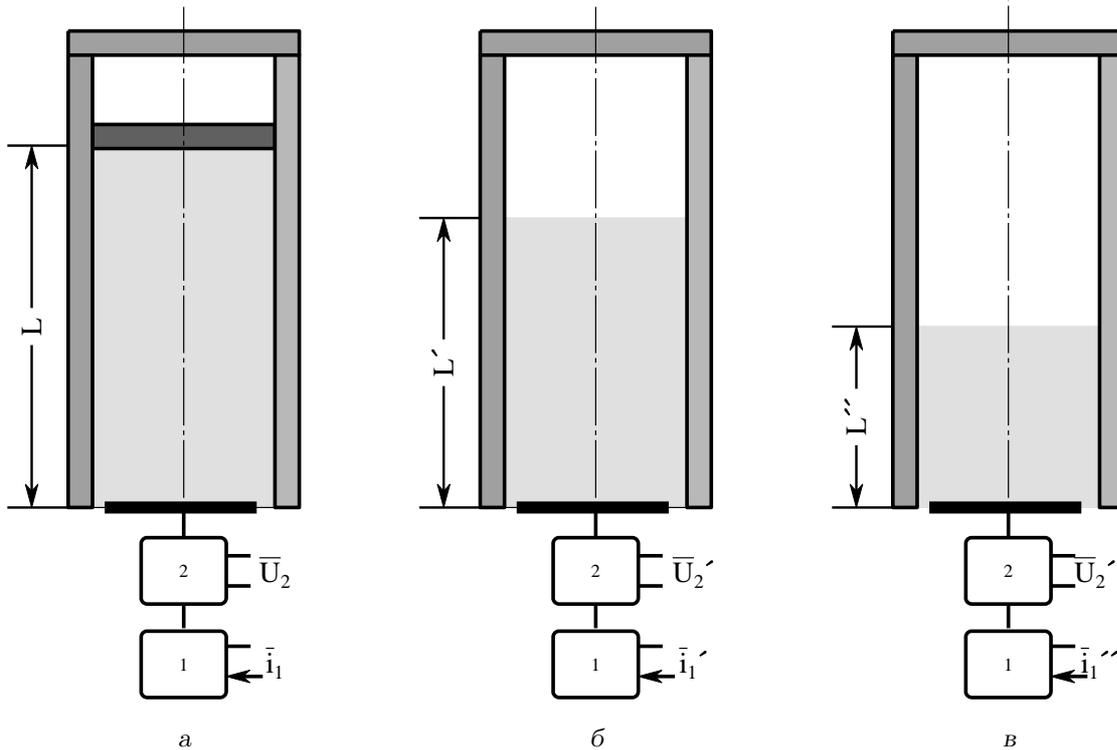


Рис. 2. Возможный вариант методики определения коэффициента отражения материалов:  
 а – первый опыт – с измерительным объектом; б, в – второй и третий опыты (с разными уровнями воды в волноводе)

на выходе 2 к току возбуждения  $\bar{i}_1''$  на входе 1 шестиполосника. Из уравнений (13)–(15) получаем

$$\frac{\bar{U}_2''}{\bar{i}_1''} = \frac{M_1 M_2}{Z_0 + Z_3''}. \quad (23)$$

Акустическое сопротивление  $Z_3''$  для волновода, заполненного водой до уровня  $L''$  и без испытуемого объекта составляет

$$Z_3'' = \frac{\rho c}{S_{\text{эф}}} (-j \operatorname{tg}(kL'')). \quad (24)$$

Введем следующие обозначения:

$$\frac{\bar{U}_2}{\bar{i}_1} = y_1, \quad \frac{\bar{U}_2'}{\bar{i}_1'} = y_2, \quad \frac{\bar{U}_2''}{\bar{i}_1''} = y_3,$$

$$\frac{y_1}{y_2} = y_{12}, \quad \frac{y_1}{y_3} = y_{13}, \quad z = \frac{\rho c}{S_{\text{эф}}}.$$

Решая систему уравнений (16), (20)–(24) относительно  $R$ , получаем выражение для определения коэффициента отражения испытуемого объекта в волноводе:

$$R = \frac{(A-1)}{(A+1)} e^{-jk2L}. \quad (25)$$

Здесь

$$A = \frac{Z_3''(y_{12}-1) - Z_3'(y_{13}-1)}{z((y_{12}-1)y_{13} - (y_{13}-1)y_{12})}. \quad (26)$$

Для приведенного на рис. 2 варианта измерений

$$A = -\frac{j}{(y_{12}-1)y_{13} - (y_{13}-1)y_{12}} \times \quad (27)$$

$$\times \left( \frac{\rho'' c''}{\rho c} (y_{12}-1) \operatorname{tg}(k''L'') - (y_{13}-1) \operatorname{tg}(kL') \right).$$

Возможна схема, когда в третьем опыте используется волновод без воды (см. рис. 3).

Сопротивление  $Z_3''$  для волновода с воздухом и открытой верхней крышкой (рис. 3, в) можно принять [8]

$$Z_3'' = \frac{\rho'' c''}{S_{\text{эф}}} (j \operatorname{tg}(k''L'')). \quad (28)$$

В выражении (28)  $\rho''$ ,  $c''$ ,  $k''$  – плотность, скорость звука и волновое число относятся к воздуху. В этом случае

$$A = \frac{j}{(y_{12}-1)y_{13} - (y_{13}-1)y_{12}} \times \quad (29)$$

$$\times \left( \frac{\rho'' c''}{\rho c} (y_{12}-1) \operatorname{tg}(k''L'') - (y_{13}-1) \operatorname{tg}(kL') \right).$$

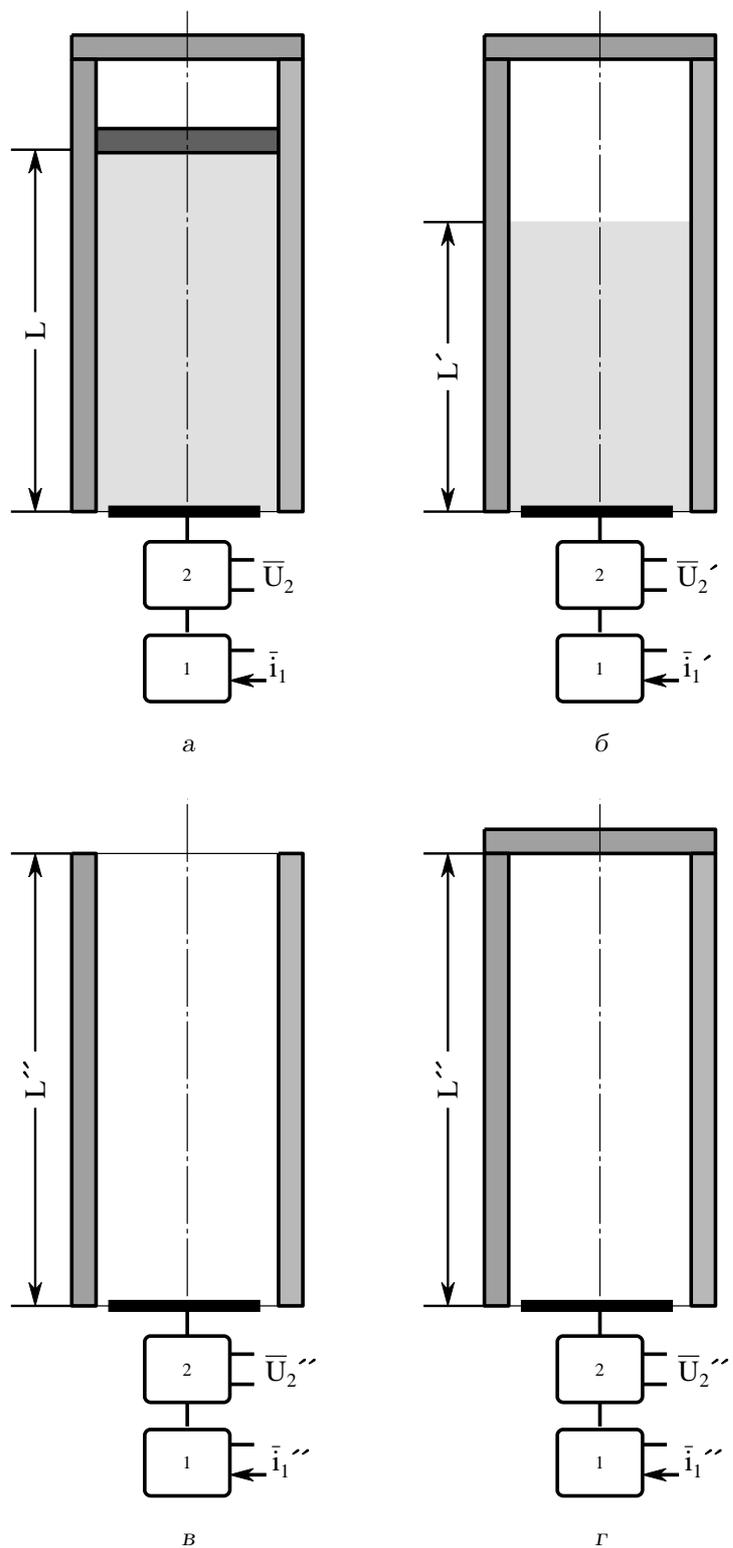


Рис. 3. Альтернативный вариант методики определения коэффициента отражения материалов:  
 а – первый опыт; б – второй опыт; в – третий опыт с пустым открытым волноводом;  
 г – третий опыт с пустым волноводом, закрытым штатной крышкой

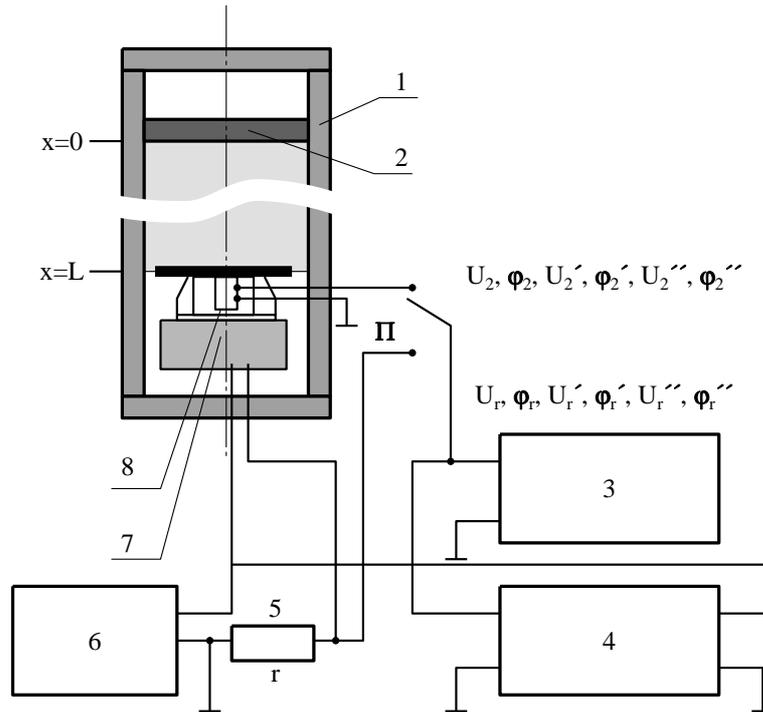


Рис. 4. Схематическое измерение измерительной установки:

1 – волновод; 2 – испытуемый объект; 3 – вольтметр; 4 – фазометр; 5 – токовое сопротивление, 6 – генератор; 7 – возбудитель колебаний в волноводе; 8 – вибродатчик

Сопротивление  $Z_3''$  для волновода с воздухом и закрытой верхней крышкой (рис. 3, г) будет [8]

$$Z_3'' = \frac{\rho'' c''}{S_{\text{эф}}} (-j \text{ctg}(k'' L'')). \quad (30)$$

Тогда

$$A = -\frac{j}{(y_{12}-1)y_{13} - (y_{13}-1)y_{12}} \times \left( \frac{\rho'' c''}{\rho c} (y_{12}-1) \text{ctg}(k'' L'') - (y_{13}-1) \text{tg}(kL') \right). \quad (31)$$

## 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Один из возможных вариантов построения измерительной установки, использующий для определения коэффициента отражения идею реакции волновода с испытуемым объектом на возбудитель колебаний, приведен на рис. 4.

Как уже упоминалось, в первом опыте измеряется отношение напряжения  $\bar{U}_2$  на выходе 2 к току возбуждения  $\bar{i}_1$  на входе 1. По результатам трех опытов запишем

$$y_1 = \frac{\bar{U}_2}{\bar{i}_1} = \frac{U_2 e^{j\varphi_2}}{U_r e^{j\varphi_r}} r = \frac{U_2}{U_r} r e^{j(\varphi_2 - \varphi_r)},$$

$$y_2 = \frac{\bar{U}_2'}{\bar{i}_1'} = \frac{U_2' e^{j\varphi_2'}}{U_r' e^{j\varphi_r'}} r = \frac{U_2'}{U_r'} r e^{j(\varphi_2' - \varphi_r')},$$

$$y_3 = \frac{\bar{U}_2''}{\bar{i}_1''} = \frac{U_2'' e^{j\varphi_2''}}{U_r'' e^{j\varphi_r''}} r = \frac{U_2''}{U_r''} r e^{j(\varphi_2'' - \varphi_r'')}.$$

Окончательно для подсчета коэффициента отражения  $R$  по формуле (25) определяем

$$y_{12} = \frac{y_1}{y_2} = \frac{U_2 U_r'}{U_r U_2'} e^{j(\varphi_2 - \varphi_r + \varphi_r' - \varphi_2')},$$

$$y_{13} = \frac{y_1}{y_3} = \frac{U_2 U_r''}{U_r U_2''} e^{j(\varphi_2 - \varphi_r + \varphi_r'' - \varphi_2'')}.$$

На практике можно измерять напряжение  $U_2$  на втором выходе шестиполосника и падение напряжения  $U_r$  на токовом сопротивлении  $r$ , а также соответствующие фазовые сдвиги  $\varphi_2$ ,  $\varphi_r$  относительно какого-либо опорного напряжения. В данном случае в качестве опорного можно принять напряжение на выходе возбуждающего генератора. Никаких требований по точности к токовому сопротивлению  $r$  нет. Оно лишь должно оставаться стабильным в процессе измерений. Величину

$r$  желателно выбрать такой, чтобы падение напряжения на нем и напряжение на выходе 2 можно было бы измерять на одной шкале вольтметра.

## ВЫВОДЫ

Предложен метод построения измерительной установки для определения коэффициента отражения звукопоглощающих акустических материалов в жестких волноводах без использования гидрофонов. Это позволяет:

- повысить эксплуатационную надежность установки при высоких гидростатических давлениях;
- упростить конструкцию волновода;
- уменьшить активную длину волновода до  $5 \div 6$  его диаметров.

1. Климов С. П., Тютюкин В. В., Вовк А. Е. Автоматизированный акустический интерферометр // Измер. техн.– 1989.– N 12.– С. 41–43.
2. Тютюкин В. В. О точности измерений характеристик материалов в акустической низкочастотной трубе // Акуст. ж.– 2002.– 47, N 6.– С. 843–852.
3. Дрейзен И. Г. Курс электроакустики.– М.: Связьрадиоиздат, 1938.– С. 230.
4. Беранек Л. Акустические измерения.– М.: ИИЛ, 1952.– С. 222–229.
5. Фурдуев В. В. Теоремы взаимности в механических, акустических и электромеханических чetyрехполосниках.– М.-Л.: Гостехиздат, 1948.– 92 с.
6. Харкевич А. А. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы // Избранные труды в трех томах: том 1.– М.: Наука, 1973.– С. 42–51.
7. Русаков И. Г. Расчеты конструкции трубы для звуковых измерений в воде // Акустические и гидроакустические измерения.– М.: Стандарт ГИЗ, 1960.– С. 51–62.
8. Иоффе В. К., Янпольский А. А. Расчетные графики и таблицы по электроакустике.– М.-Л.: Гостенергоиздат, 1954.– С. 218–219.