

НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ПОМЕХИ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ТРУБАХ

В. Г. Басовский¹, И. В. Вовк¹, А. Г. Лейко²

¹*Институт гидромеханики НАН Украины
ул. Желябова, 8/4, 03680, Киев-180, ГСП, Украина
тел. (044) 456-69-83; e-mail: basovsky@ukr.net, vovk@visti.com*

²*НИИ Гидроприборов, пер. Сурикова 3, Киев, Украина*

Рассмотрена гидроакустическая труба, предназначенная для измерений коэффициента отражения звука от различных материалов и конструкций методом 2-х гидрофонов. Установлено, что в таких трубах могут возникать специфические, ранее не изученные вибрационные помехи, существенно влияющие на точность измерений. Показано, что причиной их появления является механическая связь источника звуковых волн со стенками трубы через элементы конструкции трубы. На основе предложенной расчетной схемы проведены численные оценки относительного уровня помех и коэффициента отражения звука от тонкого слоя воздуха. Показано, что на отдельных частотах определение коэффициента отражения может оказаться практически невозможным. Предложен способ снижения уровня помех.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что для экспериментальных оценок коэффициента отражения звука от различных материалов и конструкций применяются акустические (гидроакустические) трубы. В частности, для измерений на относительно низких частотах нашли широкое применение акустические трубы, в которых используется так называемый метод двух микрофонов (гидрофонов). Об этом непосредственно свидетельствует довольно многочисленные публикации в ведущих научных и технических журналах по акустике за последние 30 лет (см., например, [1–4] и библиографию в них). Вместе с этим, опыт по созданию и эксплуатации гидроакустических труб показал, что в таких трубах существует ряд специфических, ранее не изученных, помех, которые могут приводить к существенным погрешностям в оценке коэффициента отражения.

Цель настоящей статьи – установить физическую природу этих помех и предложить пути снижения их влияния на точность оценок коэффициента отражения.

1 ПРИНЦИП РАБОТЫ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ТРУБЫ ПО МЕТОДУ 2-х ГИДРОФОНОВ

Рассмотрим типичную конструктивную схему гидроакустической трубы [6], предназначенной для оценок коэффициента отражения от слоев материала методом 2-х гидрофонов. Общий вид сечения трубы, а также все ее элементы и необходимые обозначения представлены на рис. 1.

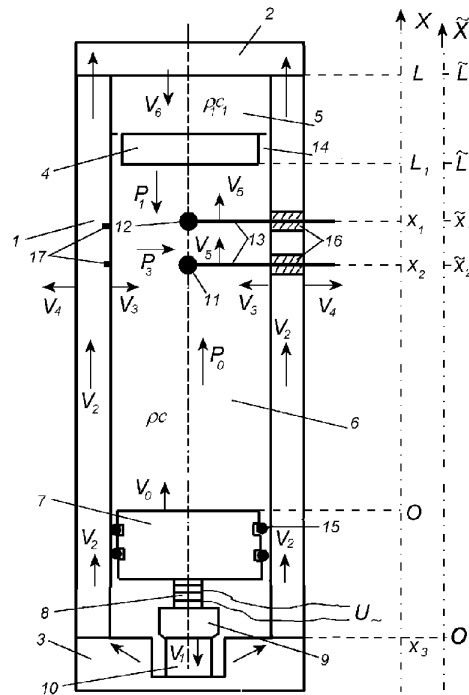


Рис. 1. Схематическое изображение трубы:

- 1 – труба, 2 – верхняя крышка, 3 – нижняя крышка, 4 – образец, 5 – слой воздуха, 6 – вода,
 7 – передняя накладка излучателя, 8 – пьезокерамический стержень, 9 – тыльная накладка, 10 – прокладка,
 11, 12 – гидрофоны, 13 – консоли, 14 – зазор, 15, 16 – уплотнения, 17 – вибродатчики

Гидроакустическая труба состоит из отрезка толстостенной стальной трубы 1 герметично закрытой сверху и снизу жесткими прочными крышками 2 и 3. В нижней части трубы расположен излучатель плоских звуковых волн. В данном случае использован стержневой излучатель, состоящий из передней накладки 7, пьезокерамического стержня 8 и тыльной накладки 9. В верхней части трубы располагается испытуемый образец материала 4 и два измерительных гидрофона 11 и 12 на оси трубы. Гидрофоны крепятся на консолях 13, которые через уплотнения 16 выводятся наружу. Внутри консолей предусмотрены полости, через которые выводятся электрические кабели от гидрофонов. Внутренняя полость трубы заполняется водой от поверхности передней накладки до поверхности образца $0 \leq x \leq L_1$, а выше располагается слой воздуха $L_1 \leq x \leq L$. Нижняя полость (между передней накладкой и нижней крышкой) заполнена воздухом и, чтобы он не просочился вверх в воду, предусмотрены уплотнения 15. Тыльная накладка 9 через упругую прокладку 10 упирается в нижнюю крышку 3 и, тем самым, не позволяет стержневому излучателю смещаться вниз под действием своего веса и веса столба воды.

Коэффициент отражения по методу 2-х гидрофонов рассчитывается по формуле [1]

$$R = \frac{p(x_2) - p(x_1)e^{jk\delta}}{p(x_1) - p(x_2)e^{jk\delta}} e^{-jk(\delta+2(L_1-x_1))}, \quad (1)$$

где $p(x_1), p(x_2)$ – давления в точках расположения гидрофонов; $\delta = x_1 - x_2$ – расстояние между гидрофонами; $k = \omega/c$, c – скорость звука в воде.

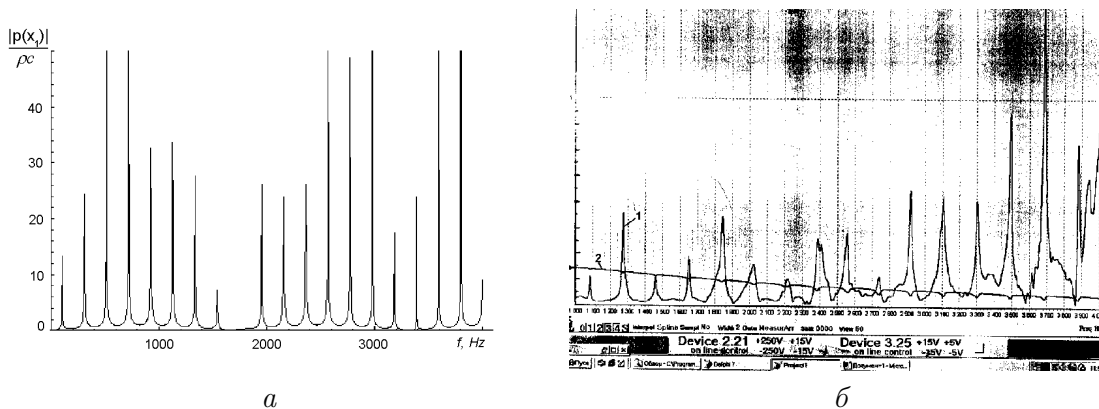


Рис. 2. Частотная зависимость:

a – модуля давления в точке $x_1 = 3.2$ м при $L_1 = 3.65$ м, когда роль образца играет раздел “вода – воздух”;
 b – 1 – амплитуды колебаний верхнего торца трубы $x = L$, 2 – подаваемого на стержневой преобразователь электрическое напряжение (эксперимент).

Из анализа самой структуры последнего выражения видно, что метод 2-х гидрофонов должен быть весьма чувствителен к резким отличиям давлений в точках расположения гидрофонов и к неидентичности амплитудно-фазовых характеристик гидрофонов. Поэтому потенциально метод должен иметь сравнительно низкую помехоустойчивость (этот вывод также следует из общей теории сверхнаправленного приема волн, поскольку синтезируемые с помощью простейшей решетки из 2-х гидрофонов кардиоидные звукоприемники – суть сверхнаправленные малоэлементные антенны [5]). К сожалению, в конечных акустических трубах как раз и наблюдаются исключительно резкие перепады давления в точках расположения гидрофонов, см. рис. 2, a .

2 ВИБРАЦИОННЫЕ ПОМЕХИ В ТРУБЕ

Рассмотрим возможные источники вибрационных помех и пути их проникновения к измерительным гидрофонам. Для этого обратимся к рис. 1. Вынужденные колебания пьезокерамического стержня 8 передаются передней накладке 7, которая колеблясь с некоторой скоростью V_0 возбуждает в воде заполняющей трубу плоскую (падающую) волну p_0 . Именно использование этой волны и волны, отраженной от образца, обеспечивает в конечном итоге возможность оценки коэффициента отражения по методу 2-х гидрофонов.

Вместе с этим, пьезокерамический стержень также возбуждает колебания тыльной накладки 9 с некоторой скоростью V_1 , которая в свою очередь, через прокладку 10, может возбудить колебания нижней крышки 3 и, далее, стенки трубы 1. Продольные колебания V_2 стенок трубы, за счет эффекта Пуассона, вызовут радиальные колебания V_3 стенок, которые в свою очередь возбуждают в воде цилиндрические сходящиеся на оси трубы волны p_3 . Именно эти волны могут оказаться теми волнами помехи, которые складываясь с прямой волной p_0 вызовут погрешности оценки коэффициента отражения звука.

Для того, чтобы убедиться в справедливости высказанных выше предположений о возможности “паразитных” вибраций стенок трубы, был проведен следующий эксперимент. На верхнем торце трубы был установлен вибродатчик, который мог фиксировать

продольные колебания трубы. В штатном режиме работы всех приборов акустической трубы, в процессе измерения коэффициента отражения от раздела “вода – воздух”, с помощью этого вибродатчика одновременно была снята частотная зависимость колебаний торца трубы. Полученные результаты приведены на рис. 2, б. Как видно колебания торца трубы (кривая 1) действительно существуют и характеризуются многочисленными острыми “пиками”, что обусловлено резонансным характером продольных колебаний трубы. И этот факт однозначно подтверждает высказанное предположение о источнике вибраций и путях их распространения. Заметим, что кривая 2 представляет собой частотную зависимость уровня подаваемого на стержневой преобразователь электрического напряжения и, как видно, представляет собой гладкую кривую, не имеющую каких-либо резонансных явлений.

Естественно, что подтвердив экспериментально наличие продольных колебаний трубы, необходимо было убедиться в том, что эти колебания могут вызывать (за счет эффекта Пуассона) радиальные колебания стенок трубы V_3 и, как следствие, возбуждать в области размещения гидрофонов волну помехи p_3 , см. рис. 1. Покажем, как это можно сделать.

3 РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ АКУСТИЧЕСКОЙ ТРУБЫ

Расчетная модель трубы основывается на использовании стандартной электро-механической эквивалентной схемы стержневого преобразователя (см. рис. 3 [7]) с учетом элементов трубы и заполняющей ее воды.

Принимая во внимание давно устоявшуюся физическую интерпретацию элементов схемы [7], имеем: Z_s -эквивалентная упругость пьезокерамического стержня; Z_m -эквивалентная масса пьезокерамического стержня; Z_1, Z_2 -механический импеданс передней и тыльной накладок; R -механические потери.

Импеданс излучения передней накладки определим с учетом [7]

$$Z_i = -j\rho cS (Z \cos(kL_1) - \sin(kL_1)) / (Z \sin(kL_1) + \cos(kL_1)) ,$$

где $Z = z/j\rho c$; z – импеданс измеряемого образца; S – площадь поперечного сечения столба воды; ρc – волновое сопротивление воды. С оценкой внешней нагрузки на тыль-

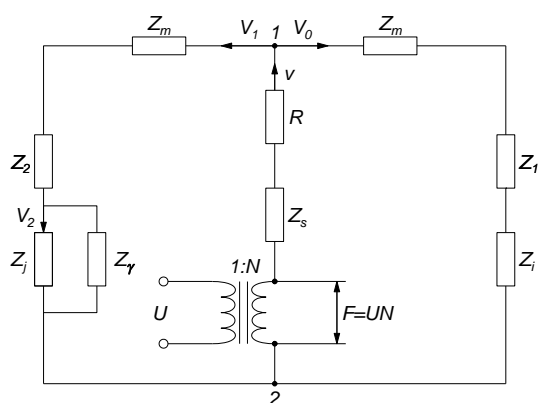


Рис. 3. Эквивалентная электро-механическая схема связанной системы стержневой преобразователь-столб воды-стальная труба

ную накладку преобразователя дело обстоит несколько сложнее. Тыльная накладка 9 связана механически с нижним торцом трубы через прокладку 10, см. рис. 1. Поэтому часть энергии, излучаемой тыльной накладкой будет “оседать” на прокладке а другая часть на нижнем торце трубы. В эквивалентной электромеханической схеме этот факт должен отражаться параллельным соединением импеданса прокладки Z_γ и импедансом трубы Z_j , приведенным к ее нижнему торцу. Если прокладку 10 (в силу ее малых волновых размеров) считать чисто упругим элементом γ , то ее импеданс можно записать как $Z_\gamma = -\gamma/j\omega$. Наконец импеданс трубы, приведенный к нижнему ее концу, равен: $Z_j = -j\rho_c c_c S_c \text{tg}(k_c \tilde{L})$, где $\rho_c c_c$ – волновое сопротивление стали; S_c – площадь поперечного сечения стенки трубы; $k_c = \omega/c_c$.

Воспользовавшись оценочным соотношением, приведенным в [8], легко связать радиальную и продольную скорости стенки трубы: $V_3(\tilde{x}) = V_2(\tilde{x})2h\sigma/L$, где $\sigma = 0.3$ – коэффициент Пуассона стали. Имея в виду эту связь, легко получить выражение для оценки звукового поля помехи

$$p_3(\tilde{x}) = -j\rho c 2h\sigma V_2(\tilde{x} = 0)(\text{tg}(k_c \tilde{L}) \sin(k_c \tilde{x}) + \cos(k_c \tilde{x}))/\tilde{L} J_1(kr_0),$$

где r_0 – внутренний радиус трубы.

Теперь поле давления в точках размещения гидрофонов следует представлять, как сумму волны $p(x)$, возбуждаемой колебаниями передней накладки стержневого преобразователя в столбе воды, и волны помехи $p_3(\tilde{x})$, которая возникает за счет возбуждения тыльной накладкой стержневого преобразователя радиальных колебаний стенки трубы. Поэтому формула для коэффициента отражения примет следующий вид

$$R = \frac{(p(x_2) + p_3(\tilde{x}_2)) - (p(x_1) + p_3(\tilde{x}_1))e^{jk\delta}}{(p(x_1) + p_3(\tilde{x}_1)) - (p(x_2) + p_3(\tilde{x}_2))e^{jk\delta}} e^{-jk(\delta+2(L_1-x_1))}, \quad (2)$$

сравни выражения (1) и (2).

4 АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для того, чтобы оценить степень влияния рассматриваемой помехи на коэффициент отражения, были проведены расчеты модуля коэффициента отражения для простейшего случая, когда роль образца выполнял слой воздуха в верхнем конце трубы. В качестве прокладки между тыльной накладкой стержневого преобразователя и нижней крышкой трубы был выбран деревянный брусок диаметром 8 см и высотой 5 см. Полагая модуль Юнга дерева $E_\gamma = 2 \cdot 10^{10}$ Па и учитывая выбранные размеры, упругость бруска γ составляла $2 \cdot 10^9$ Н/м.

Как видно, модуль коэффициента отражения (см. рис. 4, а) на некоторых частотах существенно отличается от единицы, в то время как контрольный расчет для случая $p_3(\tilde{x}) = 0$ показал, что модуль коэффициента отражения равен единице с точностью до четвертого знака после запятой во всем рассматриваемом диапазоне частот. Этот факт указывает на то, что уровень волны помехи значительный.

Таким образом, вибрации стенок гидроакустической трубы, возникающие за счет механической связи источника звука со стенками трубы, действительно могут существенно повлиять на точность оценки коэффициента отражения звука с помощью метода 2-х гидрофонов. И можно предположить, что этот эффект не будет принципиально

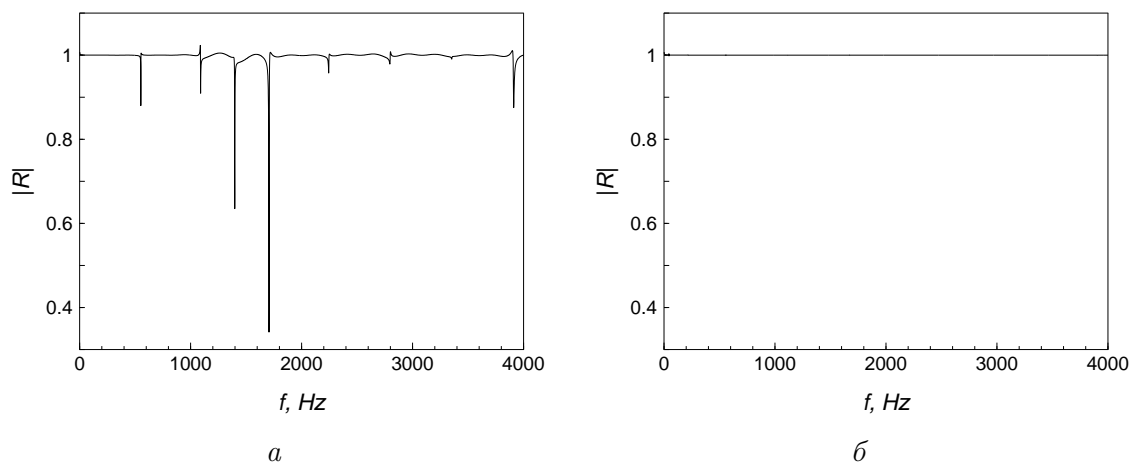


Рис. 4. Модуль коэффициента отражения:
 а – для $\gamma = 2 \cdot 10^9$ Н/м, б – для $\gamma = 2 \cdot 10^6$ Н/м

зависеть от типа используемого источника звука. Важно лишь то, насколько сильна механическая связь источника со стенками трубы.

Как нам представляется, снижения рассмотренной выше волны помехи очевиден и заключается в ослаблении механической связи тыльной накладке стержневого преобразователя с нижним торцом трубы. Для этого достаточно снизить упругость прокладки, расположенную между ними.

Мы провели численный эксперимент, для случая, когда в качестве прокладки используется не деревянный брусок, а стандартная цилиндрическая витая пружина с упругостью $\gamma = 2 \cdot 10^6$ Н/м. Результаты расчетов представлены на рис. 4, б. Сравнивая данные на рис. 4, а и рис. 4, б нетрудно убедиться сколь эффективно это простое техническое решение. Как видно, в случае применения пружины модуль коэффициента отражения с графической точностью равен единице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в гидроакустических трубах, в которых для измерения коэффициента отражения от различных материалов и конструкций применяется метод 2-х гидрофонов, могут возникать специфические вибрационные помехи существенно влияющие на точность измерений. Показано, что причиной их появления является механическая связь источника звуковых волн со стенками трубы через элементы конструкции трубы. На основе предложенной расчетной схемы проведены численные оценки относительного уровня помех и коэффициента отражения звука от тонкого слоя воздуха и показано, что на отдельных частотах определение коэффициента отражения может оказаться практически невозможным. Предложен способ снижения уровня помех, который заключается в рациональном выборе конструктивных элементов трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вовк А. Е., Климов С. П., Тютюкин В. В. Измерение коэффициента отражения звука

- в акустических трубах с применением однонаправленной системы приема // Измерительная техника.– 1975.– N 7.– С. 76–77.
2. *Вовк А. Е., Климов С. П., Тютюкин В. В.* Автоматизированный акустический интерферометр // Измерительная техника.– 1989.– N 12.– С. 41–43.
 3. *Seybert A. F, Ross D. F.* Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique // J.Acoust. Soc. Amer.– 1977.– **61**.– P. 1362–1370.
 4. *Chung J. Y, Blaser D. A.* Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory // J.Acoust. Soc. Amer.– 1980.– **68**.– P. 907–913.
 5. *Н.С. Лейко, В.И. Маяцкий* О статистических свойствах диаграммы направленности и выборе номинальных параметров Дольф-Чебышевских решеток // Антенны.– 1971.– N 12.– С. 3–12.
 6. *Евтютов А. П. и др.* Справочник по гидроакустике.– Л.: Судостроение, 1988.– 549 с.
 7. *Свердлин Г. М.* Прикладная гидроакустика.– Л.: Судостроение, 1976.– 279 с.
 8. *Кикучи Е.* Ультразвуковые преобразователи.– М.: Мир, 1972.– 424 с.