

УДК 534.12

Л. Н. ЗАХАРОВ, С. А. ИЛЬИН, В. А. КИРШОВ

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СФЕРИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ В ПРЕСНОВОДНОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Рассматривается методика определения фазовых характеристик приемников колебательной скорости в условиях плоского слоя пресноводного водохранилища. Проведенные экспериментальные работы с использованием эталонного приемника колебательной скорости малых размеров дали хорошее согласие расчетных и опытных данных.

В некоторых случаях при использовании приемников колебательной скорости (ПКС) для измерительных целей важно знать не только их чувствительность, но и фазовые характеристики. В общем случае фазовая характеристика ПКС зависит от его размера, конструкции оболочки, резонансной частоты и добротности преобразователя. В работах [1, 2] приведено выражение, связывающее комплексную амплитуду колебательной скорости ξ жесткого сферического приемника радиуса R с амплитудой колебательной скорости плоской волны ξ_0 :

$$\xi = \frac{3\rho_0 e^{i[\delta_1(\alpha) - \beta(\alpha) + \pi/2]}}{\sqrt{4 + \alpha^4} \sqrt{\left(\frac{\rho_0 \alpha}{4 + \alpha^4}\right)^2 + \left(\rho_0 \frac{2 + \alpha}{4 + \alpha^4} + \bar{\rho}\right)^2}} \xi_0, \quad (1)$$

где

$$\operatorname{tg} \delta_1(\alpha) = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha - \alpha^2 \operatorname{tg} \alpha - 2\alpha}{2 - \alpha^2 - 2\alpha \operatorname{tg} \alpha},$$

$$\operatorname{tg} \beta(\alpha) = \frac{(2 + \alpha^2) + \bar{\rho}/\rho_0 (4 + \alpha^4)}{\alpha^3},$$

$\alpha = kR$, k — волновое число, ρ_0 — плотность воды, ρ — средняя плотность приемника.

Множитель $e^{i[\delta_1(\alpha) - \beta(\alpha) + \pi/2]}$ выражения (1) определяет фазовую характеристику ПКС для различных диаметров корпусов приемников. Результаты этого расчета для диаметров $d = 126$ мм (кривая 1), $d = 100$ мм (2) и $d = 45$ мм (3) при средней плотности $\rho = 2,7$ г/см³ приведены на рис. 1.

В диапазоне 0,5—10 кгц для пустотелых приемников надо было бы также учитывать собственные частоты оболочек, в этом случае форму-

ла (1) будет уже не верна. При монолитной конструкции корпуса для рассмотренных выше размеров собственные частоты колебаний корпуса лежат значительно выше рассматриваемого нами диапазона частот и корпус приемника можно считать жестким. Резонансная частота преобразователя также может быть вынесена за пределы исследуемого диапазона, и поэтому в дальнейшем ее влияние на фазовую характеристику учитываться не будет.

Конструкция ПКС довольно сложна и состоит из многих деталей, определить влияние которых на фазовые характеристики расчетным путем вряд ли возможно. Учитывая это, мы разработали и экспериментально обосновали методику определения фазовых характеристик ПКС. Вместе с тем, сравнивая экспериментальные данные фазовых характеристик с расчетными, можно будет определить влияние некоторой некорректности формулы (1), приведенной в работах [1, 2].

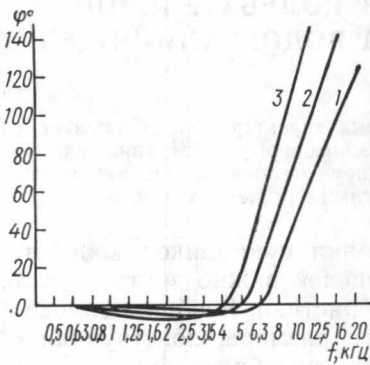


Рис. 1

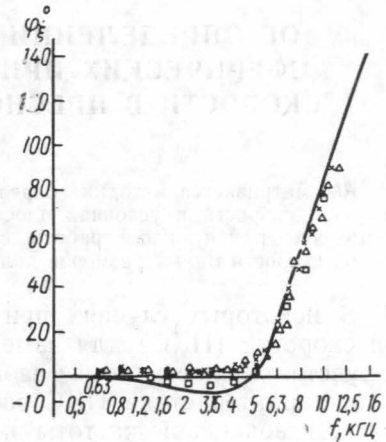


Рис. 2

В случае плоской волны экспериментальное определение фазовых характеристик ПКС может быть сведено к измерению разности фаз между сигналами, принимаемыми испытуемым приемником и малым по сравнению с длиной волны эталонным приемником давления p . Приемники давления и ПКС, как показывает расчет, должны быть разнесены по фронту волны на расстояние $r \gg 4R$, для того чтобы пренебречь влиянием вторичного поля, рассеянного сферой. Однако создать условия, в которых бы существовала плоская волна, в особенности в области низких частот, практически невозможно. В лучшем случае приходится работать в плоском слое воды, который можно считать безграничным в горизонтальной плоскости. В таких условиях между звуковым давлением и горизонтальной составляющей колебательной скорости появится разность фаз $\Delta\varphi(p, \xi)$, которая будет зависеть от частоты сигнала, местоположения приемников и излучателя и ряда других факторов.

Для оценки возможных значений разности фаз $\Delta\varphi(p, \xi)$ произведем расчеты применительно к условиям, в которых в дальнейшем были проведены экспериментальные работы. Для плоского участка пресноводного водохранилища потенциал скорости (φ) на расстоянии $x \geq 10\lambda$ согласно работе [3] равен

$$\varphi \approx \frac{2}{H} \sqrt{\frac{2\pi}{x}} e^{i(\omega t - \pi/4)} \sum_{n=1}^{n_s} m_n^{-\frac{1}{2}} e^{-im_n x} \sin(l_n h) \cdot \sin(l_n y), \quad (2)$$

где m_n и l_n — комплексные горизонтальная и вертикальная компоненты волнового вектора k ; h и y — глубина погружения излучателя и приемника, H — глубина водоема, ω — круговая частота, n_s — высший номер бегущей волны, x — горизонтальное расстояние между излучателем и приемником. Используя (2), можно найти отношение $\frac{\rho}{\xi}$ и определить разность фаз $\Delta\varphi(\rho, \xi)$ для плоского слоя из выражения

$$\frac{\rho}{\xi} = \omega \rho_0 \frac{\sum_{n=1}^{n_s} \frac{1}{(m'_n - im''_n)^{1/2}} e^{-im'_n x} \sin(l_n h) \sin(l_n y) e^{-m''_n x}}{\sum_{n=1}^{n_s} (m'_n - im''_n)^{1/2} e^{-im_n x} \sin(l_n h) \sin(l_n y) e^{-m''_n x}}, \quad (3)$$

где m'_n и m''_n — действительный и мнимый компоненты горизонтальной составляющей m_n волнового вектора k , равной

$$m_n = k_0 \sqrt{1 - \left(\frac{n\lambda}{2H}\right)^2 + \left(\frac{\rho_1 c_1 n}{2\rho_0 f \cdot H^2 k_0}\right)^2 - i \frac{\pi \rho_1 c_1 n^2}{\rho_0 f H^3 k_0^2}}. \quad (4)$$

В работе [4] получено выражение, определяющее разность фаз $\Delta\varphi(\rho_n, \xi_n)$ моды порядка n . При расстоянии $x \geq 10\lambda$ $\Delta\varphi(\rho_n, \xi_n)$ равно

$$\Delta\varphi(\rho_n, \xi_n) = \frac{1}{2} \arctg \frac{\pi \rho_1 c_1 n^2}{\rho_0 f H^3 \left[k_0^2 - \left(\frac{\pi \cdot n}{H}\right)^2 + \left(\frac{\rho_1 c_1 n}{2\rho_0 f H^2}\right)^2 \right]}. \quad (5)$$

Для водоема со средней глубиной $H=8$ м, плотностью грунта $\rho_1=1,6$ г/см³ и скоростью звука $c_1=150$ м/сек при расстоянии между излучателем и приемником $x=15$ м в исследуемом диапазоне частот (500 гц — 10 кгц) разность фаз $\Delta\varphi(\rho_n, \xi_n)$ отдельных мод n , за исключением критических, как это следует из формулы (5), близка к нулю. Отсюда следует, что калибровку приемника ПКС можно производить в плоском слое водоема, если создать условия, в которых бы существовала одна мода. Это можно сделать, выбирая соответствующим образом расстояние (x) между излучателем и приемником. Однако расстояние (x) будет порядка километров, и организация работ в этом случае будет не простым делом. Если же в точке расположения приемников будет существовать несколько мод, значение разности фаз $\Delta\varphi(\rho, \xi)$, как это следует из (3), не будет равно нулю, так как весовые коэффициенты при фазовых множителях в числителе и знаменателе (3) не равны друг другу. Произведенный расчет по формуле (3) показал, что разность фаз $\Delta\varphi(\rho, \xi)$ изменяется в довольно широких пределах. Причем эти изменения зависят сложным образом от многих параметров, которые весьма трудно контролировать. Для примера в таблице приведены значения разности фаз $\Delta\varphi(\rho, \xi)$ при изменении частоты сигнала от 800 до 870 гц.

$f, \text{гц}$	$\Delta\varphi(p, \xi), \text{град}$
800	-8
810	-5
820	-1,5
840	1,5
850	4
855	16
860	5
870	-17

Как следует из расчетов, приведенных в таблице, разность фаз $\Delta\varphi(p, \xi)$, вносимая звуковым полем даже в области низких частот, равна $15-20^\circ$, что исключает возможность использования приемника давления в качестве эталона. Для определения фазовых характеристик приемника колебательной скорости в условиях мелководья целесообразно использовать в качестве эталона приемник колебательной

скорости, размеры которого незначительны по сравнению с длиной волны, а резонансная частота преобразователя много выше верхней граничной частоты исследуемого диапазона.

Сформулируем основные требования к методике определения фазовых характеристик ПКС. Чтобы свести к нулю разность фаз между испытуемым и эталонным приемниками (ПКС), вносимую полем, необходимо приемники разместить на равном расстоянии от излучателя, причем глубина погружения приемников должна быть одинакова. Желательно рамку с приемниками размещать в пучности горизонтальной составляющей колебательной скорости. Наличие вертикальной составляющей колебательной скорости, сдвинутой на 90° относительно горизонтальной составляющей, при неидеальных характеристиках деления приемников колебательной скорости неизбежно приведет к дополнительному набегу разности фаз, значения которой могут оказаться весьма большими.

Экспериментальные работы по определению фазовой характеристики приемника колебательной скорости диаметром 100 мм проводились на плоском участке пресноводного водохранилища глубиной $H=8$ м, подробно описанного в работе [2]. В качестве эталонного приемника (ПКС) использовался сферический монолитный приемник диаметром 45 мм с резонансной частотой преобразователя выше 30 кГц.

Расстояние между приемниками было 250 мм. Ненаправленный излучатель и рамка с приемниками опускались на середину глубины моста. Горизонтальное расстояние между приемниками и излучателем равнялось 15 м. На излучатель с генератора подавались тональные сигналы. Частоты сигналов выбирались для глубины водоема 8 м с интервалом, кратным 75 гц, чтобы приемники при каждом измерении находились в пучности горизонтальной составляющей колебательной скорости. Используемый в работе фазометр имел пределы измерений $0-180^\circ$.

На рис. 2 приведена фазовая характеристика ПКС, измеренная по приведенной выше методике. Экспериментальные результаты, соответствующие отдельным сериям измерений, обозначены на рис. 2 различными значками. На графике кроме экспериментальных точек сплошной линией проведена расчетная по формуле (1) фазовая характеристика ПКС с диаметром корпуса 100 мм. Экспериментальные значения рис. 2 приведены с учетом фазовой характеристики эталонного приемника ПКС. Некоторые отклонения экспериментальных точек от теоретической кривой в области низких частот могут быть связаны с неустойчивой работой фазометра при измерении малых значений фазы.

Как следует из рис. 2 теоретическая кривая (1), и экспериментальные значения удовлетворительно согласуются друг с другом. Такое совпадение позволяет сделать вывод об обоснованности предложенной

методики определения фазовых характеристик ПКС в условиях мелко-водных бассейнов.

В заключение авторы выражают благодарность С. Н. Ржевкину за постоянное внимание и полезные советы при выполнении настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ржевкин С. Н. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., 12, № 1, 52—61, 1971.
2. Захаров Л. Н. «Акустический журнал», 17, вып. 4, 1971.
3. Захаров Л. Н., Нестеров В. С., Федосеева Э. Г. «Акустический журнал», 10, вып. 3, 293—309, 1964.
4. Гончаренко Б. И., Захаров Л. Н. О методе определения акустического сопротивления грунта в пресноводных водоемах (в печати).

Поступила в редакцию
23. 3 1972 г.

Кафедра
акустики
