

УДК 534.3

Н.Ю. Филиппова, А.В. Коржик

Національний технічний університет України «КПІ», Київ

ФОРМИРОВАНИЕ РАССЕЯННОГО ПОЛЯ ПРИЕМНЫМ ЭЛЕКТРОУПРУГИМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ В ЗАМКНУТОМ КОЛЬЦЕВОМ СЛОЕ

Исследованы угловые распределения давлений рассеянного и полного полей, формируемых приемным пьезокерамическим электроупругим цилиндрическим преобразователем с акустически мягким, акустически жестким и упругим кольцевым слоем в «сквозной» постановке на различных частотах. Показано, что сочетание акустических качеств пьезокерамической оболочки и слоя с переменной акустической жесткостью приводит к изменению диаграмм рассеяния. Установлено, что наличие акустически мягкого или акустически жесткого слоя видоизменяет полное поле в сравнении с аналогичным полем преобразователя без слоя, а для упругого слоя характер полного поля совпадает с полем цилиндрической оболочки без учета слоевого элемента.

Ключевые слова: прием звуковых волн, диаграммы рассеяния, полное поле, цилиндрическая оболочка, пьезокерамический преобразователь, волновой слой.

Введение

Данная работа продолжает тематику исследований акустических полей с учетом электроупругих свойств пьезокерамической оболочки в «сквозной» постановке для таких колебательных систем, как цилиндрические пьезокерамические круговые тонкостенные преобразователи с полностью электродированной поверхностью, которые размещены в кольцевом слое. Постановка и аналитическое решение задачи были выполнены в работе [1], где приведены выражения для неизвестных коэффициентов разложений полей, позволяющих рассчитать давления в слое и среде, напряжение на нагрузке и составляющие вектора перемещений точек поверхности оболочки. В работе [2] выполнены исследования акустических полей, получаемых как результат интерференции в различных волновых ситуациях (сочетаниях волновых сопротивлений, определяемых параметром m , волновых размеров, преобразователя и волновых расстояний), а также приведены их угловые характеристики. В работах [3, 4] представлены электромеханические характеристики цилиндрического электроупругого преобразователя размещенного в кольцевом слое для режима приема и излучения. Представляется перспективной детализация вопросов формирования полей рассеяния, что позволит более полно и объективно охарактеризовать указанные электромеханические характеристики. Поэтому изучение полей рассеяния на различных частотах падающей волны является закономерным расчетным продолжением работ [2 – 4]. Таким образом, **цель работы** – исследование угловых распределений давлений рассеянного поля, формируемого приемным пьезокерамическим электроупругим цилиндрическим преобразователем с акустически мягким, акустически жестким и упругим кольцевым слоем.

Постановка задачи. Расчеты угловых распределений давлений проведены по результатам аналитического решения задачи из области стационарной гидроэлектроупругости (работа [1]) для одиночного кругового цилиндрического пьезокерамического преобразователя (рис. 1), выполненного из пьезоматериала ЦТБС-3 с диаметром $2R_{0s} = 135 \cdot 10^{-3}$ м и толщиной стенки $h_{0s} = 6 \cdot 10^{-3}$ м, который размещен в слое с плотностью ρ_1 и скоростью звука c_1 и толщиной стенки $h_{0s} = 6 \cdot 10^{-3}$. Электроды преобразователя нагружены на активное сопротивление, приведенное к единице длины оболочки-преобразователя $Z_n = 1000 \hat{i} / \hat{i}$. Система «преобразователь – слой» помещена в водную среду с плотностью $\rho = 1000$ кг/м³ и скоростью звука $c = 1500$ м/с.

Соотношение между акустическими параметрами слоя и окружающей среды характеризуем параметром $m = \frac{\rho_1 c_1}{\rho c}$. Замкнутый кольцевой слой в

соответствии с предложенным подходом работы [5] считаем приближенно акустически мягким при $m = 0.04$, акустически жестким при $m = 4$ и упругим при $m = 0.65$. Заметим также, что жесткость самого преобразователя оболочки может изменяться с изменением частоты (например, работа [6]). Частота внешнего воздействия f выбиралась из диапазона, который заведомо перекрывал область возможных частот резонансов как низших основных форм колебаний оболочки, так и привносимых за счет использования слоя.

На указанную систему падает плоская звуковая волна под углом $\alpha = 0^\circ$.

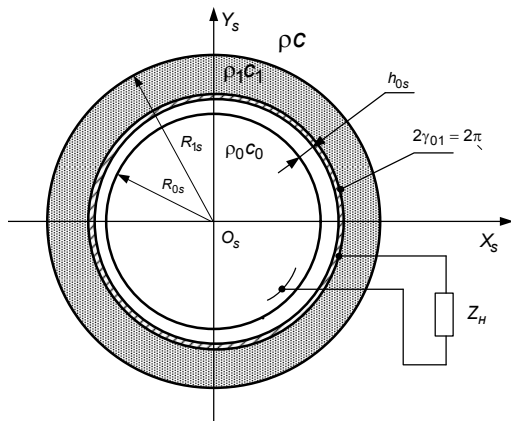


Рис. 1. Пьезокерамический преобразователь, расположенный в переходном кольцевом слое

Результаты расчетов

Результаты расчетов приведены в виде угловых распределений давлений в рассеянном поле, отнесенных к значению давлений в поле падающей плоской звуковой волны. Исследуются ситуации формирования поля рассеяния акустически жестким, акустически мягким и упругим рассеивателем, физические свойства которого определяются с учетом свойств материала слоя и пьезокерамической оболочки в указанном диапазоне частот.

На рис. 2 – 4 приведены диаграммы рассеяния, на которых кривая 1 соответствует акустически мягкому, кривая 3 – акустически жесткому и кривая 2 – упругому кольцевому слоям для различных частот.

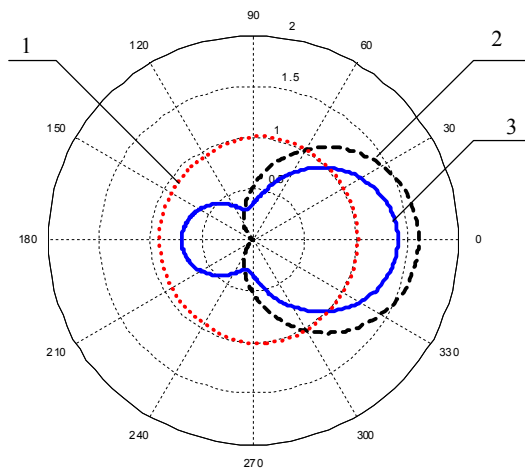


Рис. 2. Угловые распределения рассеянного поля на частоте $f=4000$ Гц

Рассмотрим кривые рассеяния на низкой частоте, при которой используется свойство пьезокерамической оболочки быть акустически жесткой. Как видим, в случае акустически мягкого кольцевого слоя и акустически жесткой пьезокерамической оболочки (рис. 2, кривая 1) диаграмма рассеяния подобна круговой диаграмме. Однако, известно [7], что монополюсное рассеяние возникает при условии того, что рассеиватель является акустически мягким.

Известно также [7], что поля рассеяния для $ka \ll 1$ акустически жесткой свободной от переходных слоев цилиндрической оболочки характеризуются кардиоидным типом рассеяния, для которого сжимаемость равна нулю. То есть, расчеты по полученному алгоритму сквозной задачи показывают, что такой же тип рассеяния свойствен объекту переменной акустической жесткости. Иначе говоря, рассматриваемая колебательная система на указанной частоте характеризуется некоторым промежуточным значением акустической жесткости, что иллюстрируется суперпозицией монополюсного и дипольного рассеяний для упругого и жесткого слоев.

Таким образом, несмотря на то, что оболочка – жесткая на низкой частоте, характер диаграмм определяют как волновые размеры колебательной системы, так и сочетание акустических качеств оболочки и слоя.

При увеличении частоты до значения резонанса нулевой моды колебаний пьезокерамического преобразователя (для которой оболочка является акустически мягкой) вид диаграмм постепенно усложняется (рис. 3).

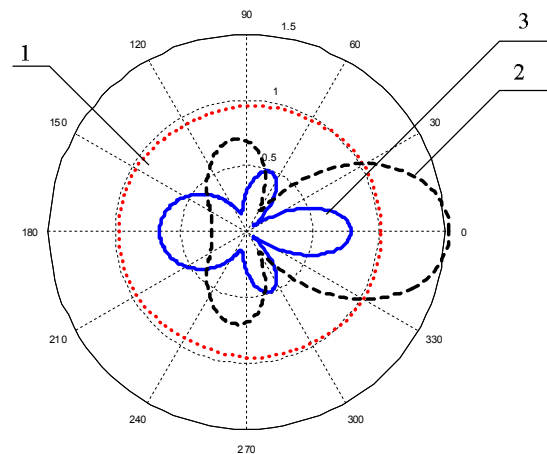


Рис. 3. Угловые распределения рассеянного поля на частоте $f=8200$ Гц

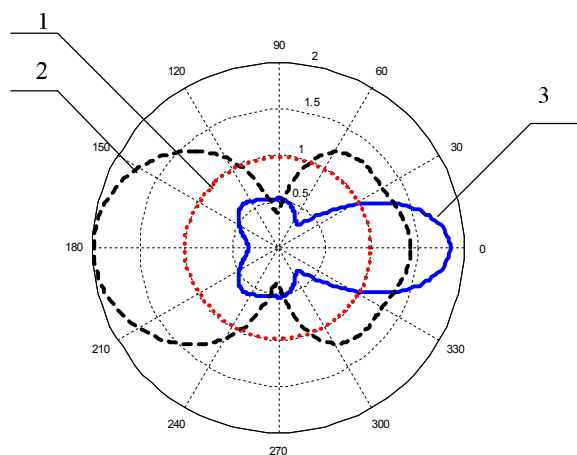


Рис. 4. Угловые распределения рассеянного поля на частоте $f=11500$ Гц

Как видно из полученных результатов, лепесток в направлении $\varphi=180^\circ$ характеризует волну, отраженную от кольцевого слоя, а лепесток в направлении $\varphi=0^\circ$ является тенеобразующим, причем он увеличивается при уменьшении длины падающей волны (рис. 4). Для частоты резонанса нулевой моды пьезо-керамической оболочки наблюдается резкое уменьшение амплитуды рассеянной волны в направлениях $\varphi \approx 55^\circ$ и $\varphi \approx 315^\circ$. При этом сочетание акустически жесткого слоя (кривая 3) и оболочки со сниженной жесткостью обуславливает многолепестковость, а промежуточное состояние слоя (кривая 2) между акустически мягким и акустически жестким показывает хорошее совпадение с распределениями полей рассеяния аналогичных упругих объектов.

Дальнейшее увеличение частоты (рис. 4) до значения резонанса первой формы колебаний приводит к более резкому разделению диаграммы рассеянного поля на области отраженной волны и теньевую область. Для акустически жесткого (кривая 3) и упругого слоев (кривая 2) такое разделение усиливается, причем теньевой лепесток (в сравнении с рис. 2, 3) имеет большую амплитуду. Для акустически жесткого и упругого слоев также появляется характерная особенность, связанная с преобладающим рассеянием в направлении падающей волны. Поле, рассеянное преобразователем в акустически мягком слое (кривая 1) не видоизменяется. Такой результат говорит о том, что колебательная система, состоящая из акустически мягкой оболочки и акустически мягкого слоя, практически не изменяет поле падающей волны, и, следовательно, создает слабое рассеянное поле.

Таким образом, сочетание качеств статической и динамической акустической жесткости системы приводит к существенным видоизменениям угловых распределений поля рассеяния во всем рассматриваемом диапазоне частот. Очевидно, что полное поле и его видоизменение с частотой также будет зависеть от указанных сочетаний акустических свойств оболочки и слоя.

Иллюстративно, на рис. 5 – 7 представлены диаграммы полного поля на поверхности колебательной системы со слоем и без его учета (кривая 3) на различных частотах. Кривой 1 показано распределения давлений на поверхности акустически мягкого слоя, кривой 2 – на поверхности упругого слоя, кривой 4 – на поверхности жесткого слоя.

Как видно из представленных результатов, даже на частоте $f = 4000$ Гц наличие акустически мягкого и акустически жесткого слоя приводит к изменению полного поля на поверхности колебательной системы. Так, наличие акустически мягкого или акустически жесткого слоя видоизменяет полное поле в сравнении с аналогичным полем преобразователя без слоя. Видоизменение при этом состоит в

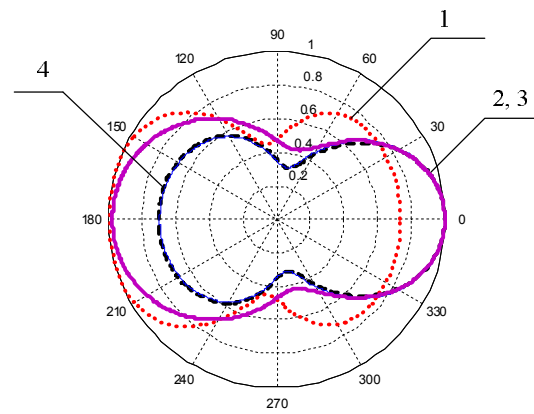


Рис. 5. Угловые распределения полного поля на частоте $f=4000$ Гц

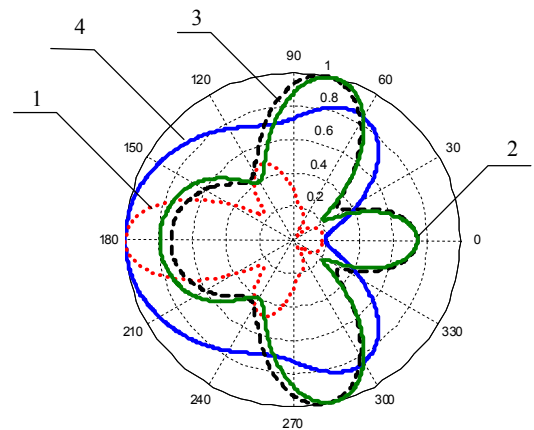


Рис. 6. Угловые распределения полного поля на частоте $f=8200$ Гц

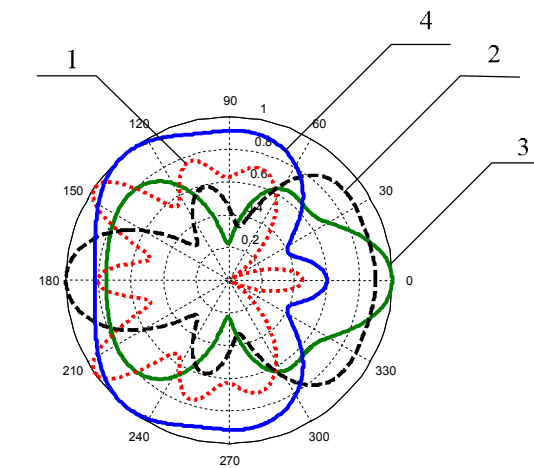


Рис. 7. Угловые распределения полного поля на частоте $f=11500$ Гц

основном в том, что амплитуда отраженного поля в направлении падения плоской звуковой волны больше на 3 дБ, а теньевой лепесток, формируемый акустически жестким слоем, совпадает с ним по уровню и раскрытию. Для ситуации акустически мягкого слоя давление на поверхности колебательной системы отлично от поля, создаваемого цилиндрической оболочкой, в части уровня поля и местоположения его минимумов. Характер полного поля

при упругом слое совпадает с полем цилиндрической оболочки без учета слоевого элемента.

Рассмотрим особенности формирования полного поля на поверхности колебательной системы на частоте $f=8200$ Гц, что соответствует частоте резонанса нулевой формы колебаний пьезокерамической оболочки (рис. 6). Известно [8], что на частоте резонанса отражение плоской звуковой волны происходит также как и от абсолютно мягкого цилиндра. Для указанной частоты, как и в предыдущем случае, сочетание акустически мягкого слоя (кривая 1) и упругих качеств оболочки приводит к совпадению диаграмм полного поля. При этом диаграммы для акустически мягкого и жесткого слоя (кривая 4) характеризуются ярко выраженной пространственной избирательностью. Так, во фронтальной и теневой области диаграммы отличны не только по форме, местоположению нулей, но и по уровню. Заметим, что давление в теневой области характеризуется низкими значениями давлений.

В случае жесткого слоя диаграмма полного поля имеет характер кардиоиды, что сходно с результатами работы [7] для акустически жесткой цилиндрической оболочки без учета переходного слоя.

На частоте первой формы колебаний оболочки совпадение полного поля с полем цилиндрической оболочкой без слоя не наблюдается. Однако, для акустически мягкого слоя и указанной частоты возбуждения имеем типичный мягкий рассеиватель [8]. При этом использование жесткого слоя изменяет жесткость системы в целом, и характер поля приобретает черты кардиоиды. Использование упругого слоя (кривая 2) смягчает систему, приближая ее по многолепестковости к акустически мягкой. Однако, по раскрытым и уровням теневого и прямого лепестков диаграмма стремится к диаграмме цилиндра без слоя.

На частоте первой формы колебаний оболочки совпадение полного поля с полем цилиндрической оболочкой без слоя не наблюдается. Однако, для акустически мягкого слоя (кривая 1) и указанной частоты возбуждения имеем типичный мягкий рассеиватель [8]. При этом использование жесткого слоя (кривая 4) изменяет жесткость системы в целом, и характер поля приобретает черты кардиоиды. Использование упругого слоя (кривая 2) смягчает систему приближая ее по многолепестковости к акустически мягкой. Однако, по раскрытым и уровням теневого и прямого лепестков диаграмма стремится к диаграмме цилиндра без слоя (кривая 3).

Известно также [5], что наличие слоя с заданными параметрами приводит к появлению резонанса в области низких частот. При этом характер полного поля колебательной системы с мягким слоем ($m=0,04$) весьма критичен к значению частоты в окрестностях резонанса. На рис. 8 представлены угловые распределения полного поля на поверхности акустически мягкого слоя на частоте 1200 Гц (кривая 1), 1300 Гц (кри-

вая 2), 1400 Гц (кривая 3). Результаты расчетов показывают стремление оболочки к акустически мягкой, не только при совпадении частоты резонанса с частотой резонанса основной формы колебаний, но и с частотой указанного дополнительного резонанса.

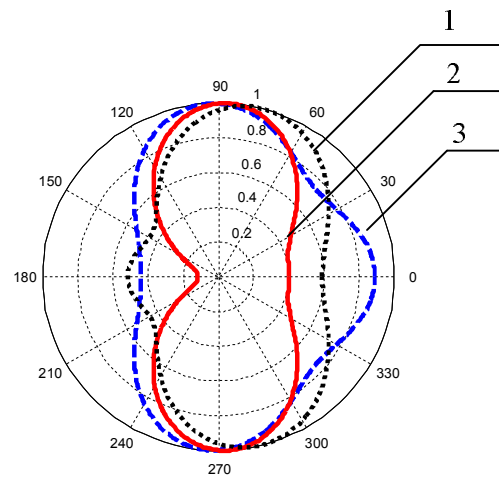


Рис. 8. Угловые распределения полного поля на поверхности акустически мягкого слоев

На рис. 9 представлены угловые распределения полного поля на поверхности акустически жесткого и упругого слоев на частоте 1000 Гц (кривая 3), 1400 Гц (кривая 2), 1800 Гц (кривая 1). Как видно из диаграмм, распределения давлений на упругом и жестком слое в окрестностях низкочастотного резонанса совпадают.

В области резонанса акустически мягкие свойства проявляются в том, что в полном поле возникают максимумы в траверзных направлениях относительно прихода звуковой волны (рис. 8). Диаграммы полного поля показывают, что характер угловых распределений соответствует дипольному типу (рис. 9), главная ось которого совпадает с направлением прихода волны. В траверзных направлениях образуются минимумы давлений, что говорит о противофазности колебаний участков оболочки для $\varphi_s = 90^\circ$ и $\varphi_s = 270^\circ$.

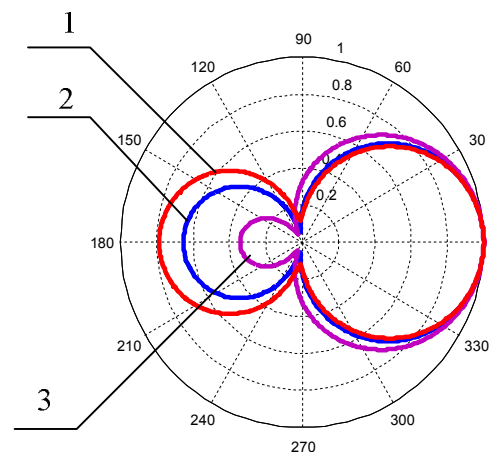


Рис. 9. Угловые распределения полного поля на поверхности акустически жесткого и упругого слоя

Выводы

В результате исследования угловых распределений давлений рассеянного поля, формируемого приемным пьезокерамическим электроупругим цилиндрическим преобразователем, который размещен в замкнутом волновом слое, показано, что на низких частотах, несмотря на то, что оболочка – жесткая, характер рассеянного поля определяют как волновые размеры колебательной системы, так и сочетание акустических качеств оболочки и слоя, а именно:

– для сочетания акустически мягкого слоя и жесткой оболочки колебательная система ведет себя как абсолютно податливый объект;

– для сочетания акустически жесткой оболочки и акустически жесткого слоя поля рассеяния имеют дипольный характер (в классическом представлении – кардиоидный тип рассеяния).

Для частоты нулевой и первой моды колебаний пьезокерамической оболочки, где колебательная система состоит из акустически жесткого слоя и оболочки со сниженной жесткостью, диаграммы рассеяния характеризуются многолепестковостью. При этом промежуточное состояние слоя между акустически жестким и акустически мягким показывает совпадение диаграмм по форме в сравнении с распределениями для аналогичных упругих объектов.

В результате исследования полных полей, формируемых колебательной системой, показано, что наличие акустически мягкого или акустически жесткого слоя видоизменяет полное поле в сравнении с аналогичным полем преобразователя без слоя:

– для ситуации акустически мягкого слоя давление на поверхности колебательной системы отлично от поля, создаваемого цилиндрической оболочкой, в части уровня поля и местоположения его минимумов;

– для упругого слоя характер полного поля совпадает с полем цилиндрической оболочки без учета слоевого элемента.

Характер распределений давлений для системы с мягким слоем ($m=0.04$) весьма критичен к значению частоты в окрестностях низкочастотного резонанса.

Список литературы

1. Филиппова Н.Ю. Постановка и решение задачи о приеме звука цилиндрическим электроупругим преобразователем с полностью электродированной поверхностью, размещенным в замкнутом волновом слое / Н.Ю. Филиппова, А.В. Коржик // *Электроника и связь*. – 2012. – №1. – С. 18-24.
2. Филиппова Н.Ю. Закономерности формирования акустических полей приемного цилиндрического пьезокерамического преобразователя, расположенного в кольцевом слое / Н.Ю. Филиппова, Е.В. Попсуй, А.В. Коржик // *Электроника и связь*. – 2012. – №6. – С. 42-48.
3. Коржик А.В. Электромеханические характеристики приемного цилиндрического электроупругого преобразователя, размещенного в кольцевом слое / А.В. Коржик, В.П. Овсяник, Е.В. Попсуй, Н.Ю. Филиппова // *Электроника и связь*. – 2013. – №2. – С. 109-114.
4. Коржик А.В. Исследование электромеханических характеристик излучающего цилиндрического пьезокерамического преобразователя с полностью электродированной поверхностью, расположенного в замкнутом кольцевом слое / А.В. Коржик, Т.С. Куроедова, Н.Ю. Филиппова // *Электроника и связь*. – 2013. – №1. – С. 102-110.
5. Гринченко В.Т. Волновые задачи рассеяния звука на упругих оболочках / В.Т. Гринченко, И.В. Вовк. – К.: Наук. думка, 1986. – 240 с.
6. Сенченко И.В. Закономерности колебаний пьезокерамических оболочек с учетом взаимодействия с окружающей средой: Дис. ... канд. техн. наук: 01. 02. 04. / Сенченко И.В. – К., 1986. – 129 с.
7. Гринченко В.Т. Основы акустики / В.Т. Гринченко, И.В. Вовк, В.Т. Мацьпура. – К.: Наук. думка, 2007. – 640 с.
8. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики / Е.Л. Шендеров. – Л.: Судостроение, 1972. – 348 с.

Поступила в редколлегию 5.08.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Г. Лейко, Государственное предприятие “Киевский научно-исследовательский институт гидроприборов”, Киев.

ФОРМУВАННЯ РОЗСІЯНОГО ПОЛЯ ПРИЙМАЛЬНИМ ЕЛЕКТРОПРУЖНИМ ЦИЛІНДРИЧНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ В ЗАМКНУТОМУ КІЛЬЦЕВОМУ ШАРІ

Н.Ю. Філіппова, О.В. Коржик

Досліджено кутові розподіли тисків розсіяного і повного полів, сформованого прийомним п'єзокерамічним електропружним циліндричним перетворювачем з акустично м'яким, акустично жорстким і пружним кільцевим шаром в «наскрізний» постановці на різних частотах. Показано, що поєднання акустичних якостей п'єзокерамічної оболонки і шару із змінною акустичною жорсткістю призводить до зміни діаграм розсіювання. Встановлено, що наявність акустично м'якого або акустично жорсткого шару видозмінює повне поле в порівнянні з аналогічним полем перетворювача без шару, а для пружного шару характер повного поля збігається з полем циліндричної оболонки без урахування шарового елемента.

Ключові слова: прийом звукових хвиль, діаграми розсіювання, повне поле, циліндрична оболонка, п'єзокерамічний перетворювач, хвильовий шар.

FORMATION OF SCATTERED FIELD OF ELECTROELASTIC CYLINDRICAL TRANSDUCER IN A CLOSED LAYER

N.Yu. Filipova, A.V. Korzhik

The angular distribution of the scattered pressure and complete the fields created by the reception electroelastic cylindrical piezoceramic transducer with an acoustically soft, acoustically tough and resilient annular layer in the "through" staged at different frequencies. It is shown that the combination of acoustic qualities and a layer of piezoelectric membrane with variable acoustic stiffness alters the scatterplot. It is established that the presence of an acoustically soft or acoustically rigid layer modifies the total field compared to the same field without a converter layer and the elastic layer to the character of the complete field coincides with the field of a cylindrical shell without layers of elements.

Keywords: scatter plots, the total field, the cylindrical shell piezoelectric transducer, the wave layer.