

УДК 539.1

И.В. Кандрачук

Национальный технический университет Украины (КПИ), Киев

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛОСКОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ С АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ С ЭКРАНАМИ

Выполнен анализ числовых результатов физических характеристик связанных полей, возникающих в круговых и дуговых цилиндрических решетках, образованных из пьезокерамических цилиндрических преобразователей и податливого экрана, при взаимодействии их с плоскими акустическими волнами в зависимости от параметров преобразователей, решеток и волн. Установлены физические закономерности влияния этого взаимодействия на акустические поля решеток и преобразователей.

Ключевые слова: преобразователь, акустическое поле, акустическая волна, акустический экран, пьезокерамические преобразователи, цилиндрические решетки, дуговые решетки.

Введение

Целью данной работы является изучение физических закономерностей взаимодействия плоской акустической волны с конкретными типами антенных решеток с экранами и его влияния на формирование этих решетками и их элементами акустических полей.

Постановка задачи. Приведем аналитические

выражения для численной оценки физических характеристик акустических, механических и электрических полей, создаваемых круговыми (рис. 1, а) и дуговыми (рис. 1, б) гидроэлектроупругими цилиндрическими системами, образованными из конечного числа N одинаковых круговых тонкостенных цилиндрических преобразователей и круговых цилиндрических акустических экранов во внутренней

полости систем, полученные в работе [1]. Продольные оси преобразователей и экранов параллельны между собой. Все преобразователи радиусом $R_k = R$ и толщиной $h_k = h$ выполнены из пьезокерамики состава ЦТБС-3, радиально поляризованы, нагружены на некоторое электрическое сопротивление z_H и заполнены воздухом во внутренней полости. Продольные оси преобразователей располагаются на окружности радиуса L равномерно либо по всей окружности $\varphi_{10} = 0^\circ$; $\varphi_{20} = 90^\circ$; $\varphi_{30} = 180^\circ$; $\varphi_{40} = 270^\circ$ (рис. 1, а); либо в пределах некоторой дуги $\varphi_{10} = 144^\circ$; $\varphi_{20} = 168^\circ$; $\varphi_{30} = 192^\circ$; $\varphi_{40} = 216^\circ$ (рис. 1, б). В качестве акустического экрана был выбран круговой цилиндр радиуса $R_3 = R_0$ с предельными жесткостными свойствами в виде идеально податливого тела. Системы располагались в жидкости с параметрами $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$ и $c = 1500 \text{ м/с}$ и возбуждались плоскими волнами частотой f .

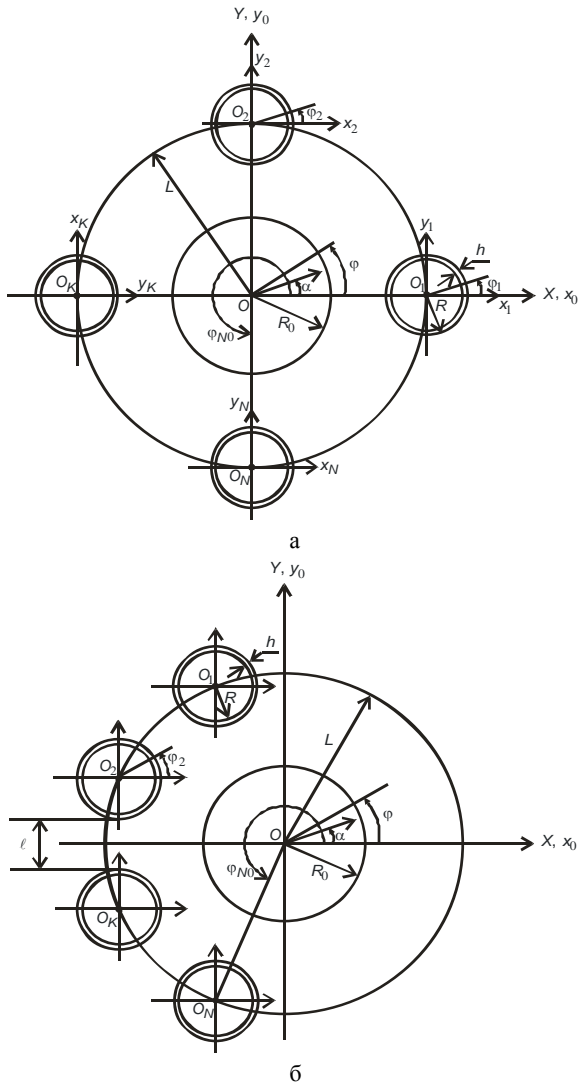


Рис. 1. Нормальное сечение круговой (а) и дуговой (б) решеток, образованных из круговых цилиндрических преобразователей и кругового цилиндрического акустического экрана

В качестве оцениваемых физических характеристик были выбраны характеристики акустических, механических и электрических полей – давление поля рассеяния в дальней зоне $P^{(0)}$, давление полного поля на поверхности преобразователей $P_0^{(i)}$, радиальные перемещения $W^{(i)}$ поверхности преобразователей и электрические напряжения на выходе системы U_Σ и отдельных преобразователей в ее составе $U^{(i)}$ для различных направлений прихода плоских волн.

Анализ результатов числового моделирования

Расчеты производились для следующих значений отмеченных выше параметров систем и их элементов: $N = 4$; $L = 5R$; $R = 0,0675 \text{ м}$; $h = 0,006 \text{ м}$; $R_3 = 0,24 \text{ м}$; расстояние в дуге между поверхностями соседних элементов $\ell = 0,09R$; $f = 4 \text{ кГц}$; 10 кГц (частоты плоских падающих волн); $z_H = 1000 \text{ Ом}$ (электрические нагрузочные сопротивления преобразователей). Резонансная частота пульсирующих колебаний преобразователей в воде составляла 10 кГц . Количество членов, учитываемых в разложениях полей по цилиндрическим волновым функциям [1], выбиралось так, чтобы вклад последнего учитываемого члена не превышал 3...4 % от суммарного получаемого результата.

Анализ обширного численного материала, полученного в ходе выполнения расчетов, позволил выявить и представить на рис. 2 – 5 наиболее типичные результаты. Кривые рисунков с индексами «а» и «б» приведены для круговых и дуговых систем соответственно. Кривые рис. 2 описывают угловые зависимости давления рассеянного поля при углах падения плоских волн $\alpha = 0^\circ$ (кривые 1, 1') и 30° (кривые 2, 2'). Кривые 1 и 2 построены для $f = 10 \text{ кГц}$, а кривые 1' и 2' для $f = 4 \text{ кГц}$. Графики рис. 3 приведены для давлений $P_0^{(i)}(\varphi_i)$ на поверхности преобразователей в составе системы при угле падения плоской волны $\alpha = 0^\circ$ на частоте $f = 10 \text{ кГц}$. Номера кривых соответствуют номерам преобразователей в системе.

Графики рис. 4 описывают угловые зависимости электрического напряжения на выходе одиночных преобразователей в составе систем на частотах 10 кГц и 4 кГц (обозначения со штрихом). Номера кривых соответствуют номерам преобразователей в системах.

Для обеспечения возможности сравнения характеристик преобразователей в составе и вне системы и выявления таким образом влияния взаимодействия полей в системах на параметры преобразователей на рис. 5 приведены угловые зависимости нормированных амплитуд давления на поверхности

преобразователя (рис. 5, а), и электрического напряжения (рис. 5, б) на выходе одиночного преобразователя, расположенного вблизи податливого экрана при угле падения плоской волны $\alpha = 0^\circ$. Кривые 1 построены для $f = 10$ кГц, кривые 2 – $f = 4$ кГц.

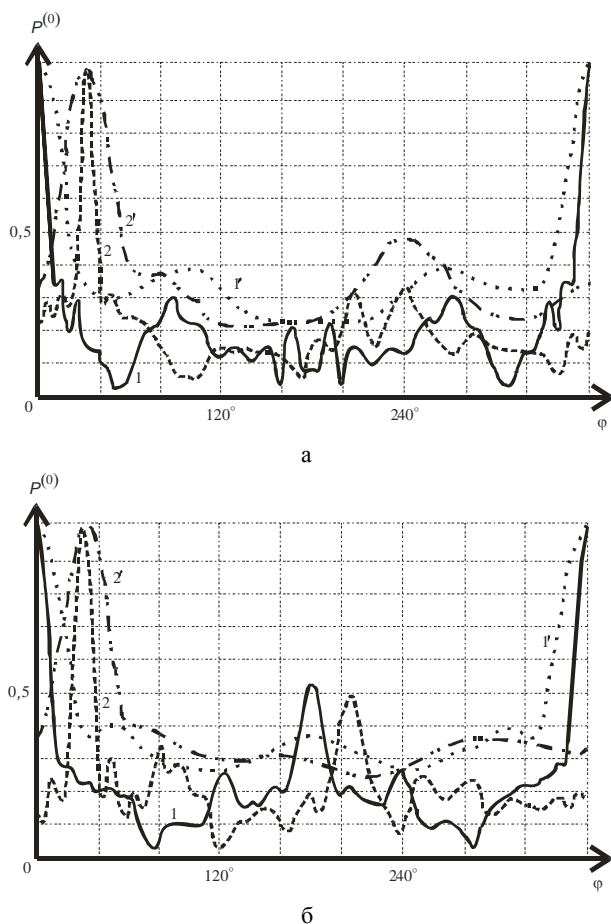


Рис. 2. Угловые зависимости нормализованных акустических давлений рассеянного поля решеток преобразователей с идеально податливым акустическим экраном на частотах $f = 10$ кГц и $f = 4$ кГц (обозначения со штрихом) для разных углов прихода α плоских акустических волн: 1, 1' – $\alpha = 0^\circ$; 2, 2' – $\alpha = 30^\circ$

Произведем анализ полученных результатов, сравнивая их, при необходимости, с результатами, приведенными в работе [2], что позволит выявить влияние на характер и степень взаимодействия преобразователей в составе систем пассивных акустических элементов, включенных в их состав.

Анализ графиков рис. 2 и сопоставление их с соответствующими кривыми работы [2] позволяет констатировать, что установленные закономерности формирования рассеянного поля системами преобразователей без экрана во внутренней полости характерны и для систем с круговыми цилиндрическими экранами. Так, при малых волновых размерах систем диаграммы рассеяния близки к однородным, а с увеличением отношения f/f_0 , где, как и ранее f_0 – частота пульсирующих колебаний электроупругой оболочки (преобразователя), по направлению

падения плоских волн начинает формироваться преимущественное рассеяние волн. При этом с увеличением волновых размеров рассеивающей системы диаграмма рассеяния обостряется, а боковое рассеяние уменьшается. Наряду с этим появляются и существенные отличия в полях рассеяния рассматриваемых систем, обусловленные введением в состав систем экранов. Прежде всего необходимо отметить, что в целом уровень бокового рассеянного поля в системах с экраном существенно выше, чем в системах без экрана. При этом имеющие место в системах без экрана большие уровни боковых лепестков, прилегающие к основному лепестку рассеяния, не наблюдаются. Установленные отличия в диаграммах рассеяния систем с экранами характерны как для круговых, так и для дуговых систем.

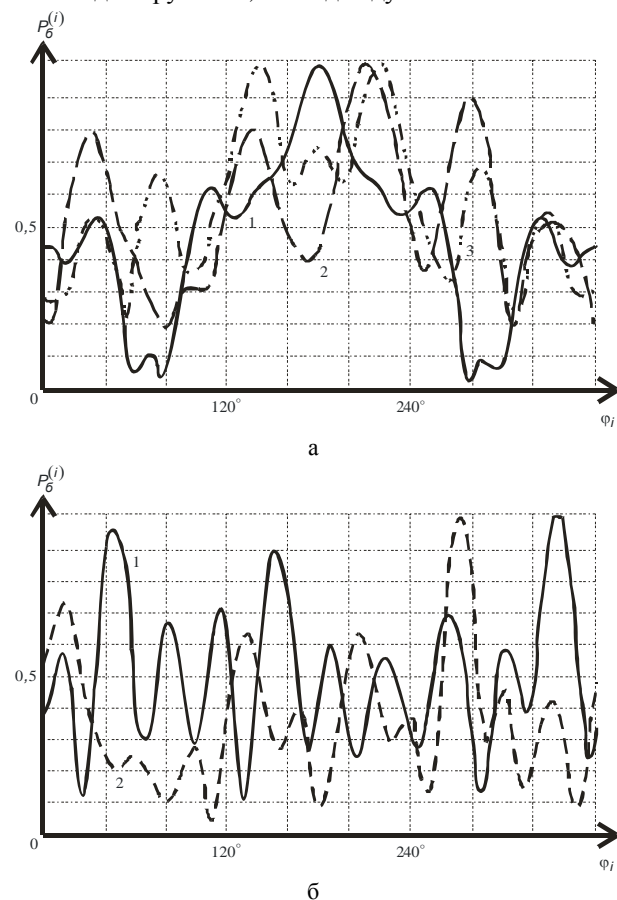


Рис. 3. Угловые зависимости нормализованных акустических давлений на поверхности преобразователей с номерами $i = 1, 2, 3$ решеток с идеально податливым экраном на частоте $f = 10$ кГц для угла прихода плоской волны $\alpha = 0^\circ$: 1 – $i = 1$, 2 – $i = 2$, 3 – $i = 3$

Как и в системах без экрана, в системах с акустическим экраном значительную роль в формировании полей играет взаимодействие всех элементов системы по акустическому полю. Именно его наличием можно объяснить существенное отличие полей преобразователей в составе системы по сравнению с таковыми для преобразователей вне системы. При этом следует учитывать еще и наличие или отсутствие взаимодействия преобразователя и акустическо-

го экрана. Это хорошо видно при анализе кривых распределения амплитуд давления поля на поверхности преобразователей (рис. 3 и 5, а) и сопоставление их с кривыми работы [2]. Сравнение кривых показывает, что взаимодействие акустического экрана и кругового цилиндрического преобразователя приводит к существенному изменению характера распределения амплитуд давления по поверхности преобразователя в решетке с экраном по сравнению с одиночным преобразователем. Влияние взаимодействия полей экрана и преобразователя приводит к сглаживанию поля давлений системы (рис. 5, а, кривая 1) на частоте резонанса преобразователя и увеличению неравномерности этого поля на более низких частотах (рис. 5, а, кривые 2).

Возникновение в системе преобразователей в присутствии экрана взаимодействия не только между преобразователем и экраном, но и между самими преобразователями обуславливает дальнейшие изменения распределений давлений в ближнем поле системы. Так, на резонансной частоте преобразователей (рис. 3) присутствие экрана вблизи них видоизменяет характер распределения давлений на поверхности преобразователей по сравнению с системами без экрана [2].

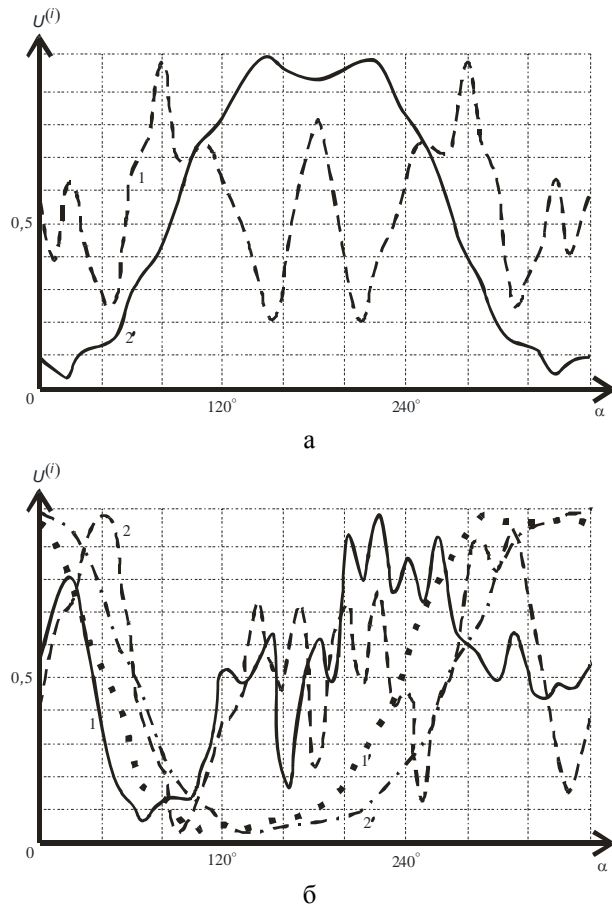


Рис. 4. Зависимости нормализованных электрических напряжений на выходе одиночных преобразователей $i = 1; 2$ в составе решеток с идеально податливым экраном на частотах $f = 10$ кГц и $f = 4$ кГц (обозначения со штрихом) от угла прихода α плоских волн: $1, 1' - i = 1; 2, 2' - i = 2$

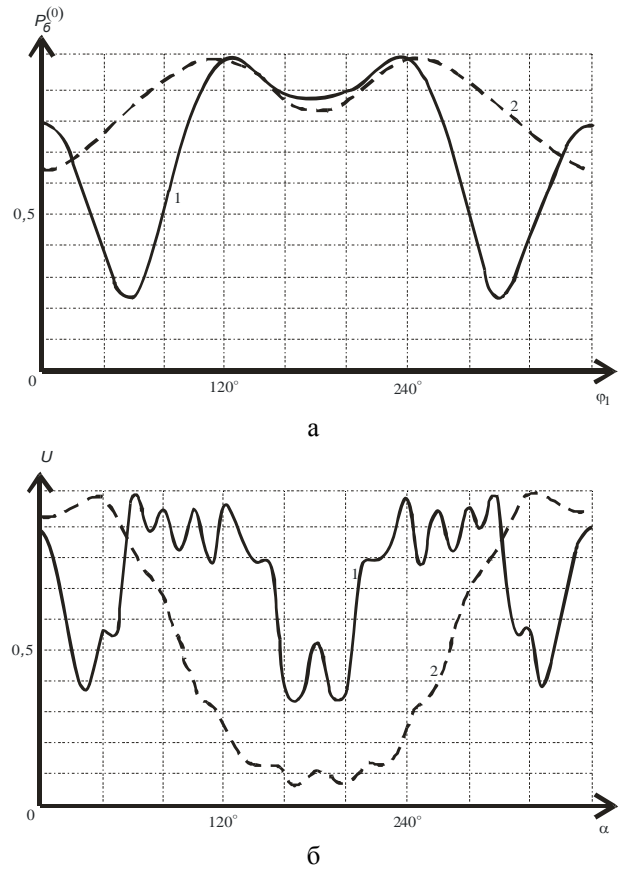


Рис. 5. Угловые зависимости нормализованных амплитуд акустических давлений на поверхности преобразователя (а) и электрических напряжений на выходе преобразователя (б) для одиночного преобразователя, расположенного вблизи податливого экрана (кривые 1 и 2) при угле падения $\alpha = 0^\circ$ (а) плоских волн: $1 - f = 10$ кГц, $2 - f = 4$ кГц

Это проявляется прежде всего в том, что разные преобразователи имеют большие различия полей как между собой, так и по сравнению с одиночным преобразователем вблизи экрана. Кроме того, если в отсутствие экрана почти все преобразователи в направлении падения плоской волны имели провал в распределении давлений, то наличие податливого экрана обуславливает перемещение этого провала в область углов, противоположных углу α . В области низких частот возникновение взаимодействия между полями преобразователей и экрана приводит к существенному увеличению неоднородности полей в ближней зоне систем по сравнению с системами преобразователей без экрана, причем степень этой неоднородности в значительной мере определяется степенью жесткости экрана, конфигурацией системы и местоположением преобразователя в системе. Для дуговых систем поля давлений преобразователей в составе систем резко отличаются от полей давлений преобразователей в составе круговых систем или одиночного преобразователя вблизи экрана. В то же время для одной и той же дуговой системы поля преобразователей мало отличаются между собой, что обусловлено незначительными отличиями их местоположений в составе системы.

Влияние взаимодействия элементов систем, обусловленного многократным обменом в системе рассеянными волнами между преобразователями и между преобразователями и экраном, на формирование волновых полей преобразователями в составе системы наглядно прослеживается путем сопоставления диаграмм направленности при работе преобразователей в составе системы и вне ее. Анализ кривых рис. 5, б показывает, что размещение преобразователя вблизи экрана приводит к появлению пространственной избирательности преобразователя с существенно различающимися уровнями диаграмм направленности вдоль оси ОХ. На высоких частотах в присутствии податливого экрана (кривая 1) диаграмма направленности преобразователя с экраном может раздваиваться. Поскольку одиночный цилиндрический преобразователь в безграничной среде имеет круговую диаграмму направленности в плоскости его нормального сечения, установленные особенности направленности преобразователя в присутствии экрана обусловлены только взаимодействием между ними.

Рассмотрим, какое влияние на направленные свойства преобразователей вблизи экрана оказывает размещение их в составе системы. Анализ кривых рис. 4 показывает, что в области частоты резонанса нулевой моды преобразователей ($f = 10$ кГц) взаимодействие преобразователей в составе круговой решетки велико и обуславливает значительные изменения их диаграмм направленности (кривые 1) по сравнению с диаграммой одиночного преобразователя вблизи экрана (рис. 5, б, кривая 1). При снижении рабочей частоты взаимодействие преобразователей в круговой системе с экраном ослабевает и затем исчезает полностью, о чем свидетельствует идентичность их диаграмм направленности в составе (рис. 4, а) и вне (рис. 5, б, кривая 2) системы. Заметим, что в системе без экрана на низких частотах в круговых решетках еще имело место довольно сильное взаимодействие [2]. Отметим также, что в силу симметрии круговой системы все ее преобразователи имеют одинаковые диаграммы направленности.

Для дуговой цилиндрической системы (рис. 5, а)

такая симметрия нарушается и причиной нарушения является наличие сильного взаимодействия даже в области низких частот. Это обусловлено более тесным расположением преобразователей в дуговой системе. При этом отличия в диаграммах направленности соседних преобразователей более значительны в области высоких частот (рис. 4, б, кривые 1 и 2). В то же время симметрия системы относительно оси ОХ обуславливает одинаковость диаграмм направленности соответствующих преобразователей в дуговой системе.

Выводы

Анализ числовых результатов угловых зависимостей акустических параметров (давление в дальнем поле и на поверхности преобразователей) преобразователей при работе их в составе и вне систем показывает, что в системах с акустическим экраном возникают взаимодействия двух видов элементов систем по акустическому полю – взаимодействие между преобразователями и экраном и взаимодействие собственно между преобразователями. Первый вид взаимодействия более сильный и его влияние проявляется во всем исследуемом частотном диапазоне. Влияние второго вида взаимодействия наиболее сильно проявляется в области резонансных частот преобразователей.

Список литературы

1. Кандрачук И.В. Расчет звукового поля, формируемого системой цилиндрических пьезокерамических преобразователей и экрана / И.В. Кандрачук // Системы обработки информации: сб. науч. пр. – Х.: XV ПС, 2008. – Вып. 7 (74). – С. 59-64.
2. Закономерности взаимодействия плоской акустической волны с цилиндрической решеткой, состоящей из пьезокерамических цилиндрических преобразователей / А.Г. Лейко, В.Г. Савин, В.П. Ткаченко, Ю.Е. Шамарин // Акуст. вист. – 2000. – Т. 3, № 1. – С. 51-60.

Поступила в редколлегию 10.12.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.М. Порошин, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

ВЗАЄМОДІЯ ПЛОСКОЇ АКУСТИЧНОЇ ХВИЛІ З АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ З ЕКРАНАМИ

І.В. Кандрачук

Виконаний аналіз числових результатів фізичних характеристик зв'язаних полів, що виникають в кругових і дугових циліндричних решітках, що утворені з п'єзокерамічних циліндричних перетворювачів та податливого екрану, при взаємодії їх з плоскими акустичними хвилями в залежності від параметрів перетворювачів, решіток і хвиль. Встановлені фізичні закономірності впливу цієї взаємодії на акустичні поля решіток і перетворювачів.

Ключові слова: перетворювач, акустичне поле, акустична хвиля, акустичний екран, п'єзокерамічні перетворювачі, циліндричні решітки, дугові решітки.

CO-OPERATING OF FLAT ACOUSTIC WAVE WITH THE GRATES OF AERIALS WITH SCREENS

I.V. Kandrachuk

The thesis deals with the numeral analysis of connected fields appeared in round and arch cylindrical lattices, which were formed from piezoceramic cylindrical transformations and pliant screen in their interaction with flat acoustic waves in their dependence from parameters of transformers, lattices and waves. The physical conformity to natural laws of this interaction on acoustic fields of lattices and transformers are explored.

Keywords: transformer, acoustic field, acoustic wave, acoustic screen, piezoceramic transformations, cylindrical lattices, arch lattices.