

УДК 539.1

И.В. Кандрачук, канд. техн. наук

## Анализ свойств физических полей, создаваемых системами пьезокерамических цилиндрических преобразователей, расположенных вблизи акустического экрана в виде полого упругого цилиндрического тела

Выполнен численный анализ физических характеристик связанных полей, возникающих в пьезокерамических цилиндрических преобразователях круговых и дуговых цилиндрических решеток с упругим акустическим цилиндрическим экраном в их внутренней полости при взаимодействии решеток с плоскими акустическими волнами, в зависимости от параметров преобразователей, решеток и волн. Установлены закономерности этого взаимодействия на акустические, механические и электрические поля решеток и преобразователей.

The thesis deals with the analysis of numerical results of physical characteristics of connected fields which appear in piezoceramic cylindrical transformations of round and arch cylindrical lattices with resilient acoustic cylindrical screen in their inner lap-robe together with interaction of flat acoustic waves depending on parameters of transducers, lattices and waves.

Conformity to natural laws of this interaction on acoustic, mechanic and electric fields of lattices and transformations were determined.

**Ключевые слова:** цилиндрический пьезокерамический преобразователь, акустический экран, электроупругий цилиндр, звуковое поле, рассеяние акустических волн.

### Введение

В работе [1] были получены аналитические соотношения, позволяющие выполнить количественные оценки параметров акустических, механических и электрических полей круговых пьезокерамических цилиндрических преобразователей, образующих криволинейные цилиндрические решетки содержащие акустический экран в виде кругового электроупругого цилиндра при возбуждении решеток плоскими акустическими волнами. Целью данной работы является изучение закономерностей влияния взаимодействия плоских акустических волн с круговыми и дуговыми антенными решетками рассматриваемого типа на физические поля, формируемые этими решетками и их элементами.

### Постановка задачи

Рассмотрим круговые (рис. 1, а) и дуговые (рис. 1, б) цилиндрические системы радиуса  $L$ , образованные из конечного числа  $N$  круговых тонкостенных цилиндрических пьезокерамических преобразователей радиуса  $R$  с радиальной поляризацией и вакуумированной внутренней полостью и кругового цилиндрического экрана радиуса  $R_3$ , расположенного во внутренней полости систем и выполненного в виде полой тонкой вакуумированной металлической упругой оболочки. Применим аналитические выражения, полученные в работе [1], для численного анализа характеристик акустических, механических и электрических полей, создаваемых такими системами при возбуждении их падающими плоскими волнами.

В качестве оцениваемых физических характеристик были выбраны: звуковое давление поля рассеяния в дальней  $P_A^{(0)}$  зоне системы и полного поля на поверхности  $P_0^{(0)}$  преобразователей и экрана, радиальные перемещения  $W$  на поверхности преобразователей и экрана, также электрические напряжения на выходе системы и отдельных преобразователей для различных направлений прихода плоских волн.

Расчеты проводились для круговой и дуговой цилиндрических систем с числом преобразователей в системах  $N = 4$ . Центры преобразователей располагались на окружности радиуса  $L = 5R$ , либо равномерно по всей окружности (круговая система), либо равномерно по дуге с расстоянием между поверхностями соседних преобразователей  $l = 0,09R$ . Все преобразователи в системах имели один и тот же радиус  $R = 0,0675$  м и толщину  $h = 0,006$  м, были выполнены из пьезокерамики состава ЦТБС-3 и нагружались на активное сопротивление  $R = 1000$  Ом. Внутренний экран представлял собой вакуумированную круговую цилиндрическую оболочку радиусом  $R_3 = 0,24$  м и толщиной  $h_3 = 0,008$  м, выполненную из титанового

сплава ВТ1-0. Резонанс пульсирующих колебаний этой оболочки равен  $f_p = 4 \text{ кГц}$ . Рассматриваемые системы тел располагались в воде ( $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3; c_0 = 1500 \text{ м/с}$ ). Падающие на системы плоские волны имели частоты  $f = 4 \text{ кГц}$  и  $f = 10 \text{ кГц}$ . Выбор таких частот позволяет изучить поведение характеристик систем при возбуждении преобразователей и экрана как в области нулевой моды (соответственно 10 кГц и 4 кГц), так и вдали от них. Количество членов, учитываемых в разложениях полей, выбиралось таким образом, чтобы вклад последнего учитываемого члена не превышал 3-4% от суммарного получаемого результата.

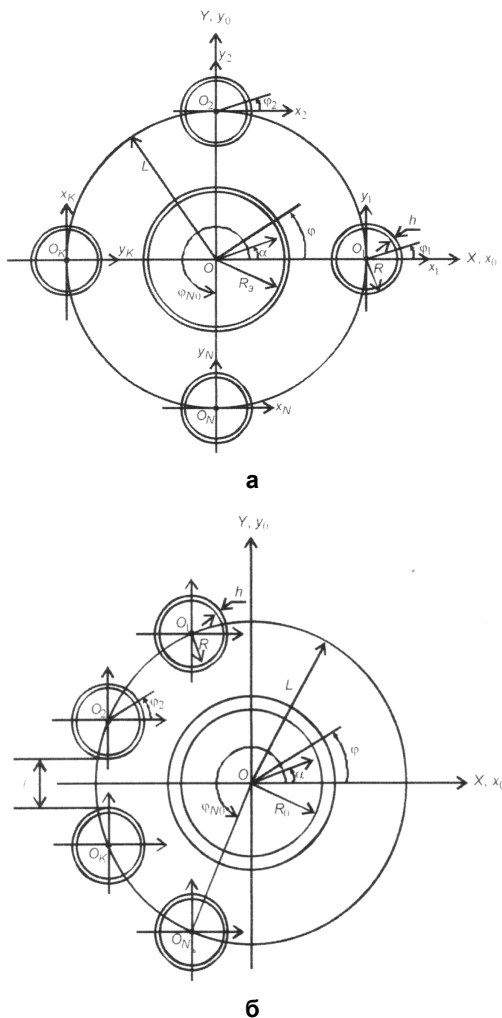


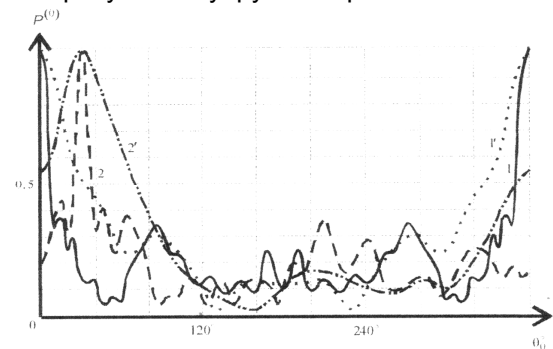
Рис. 1. Нормальное сечение круговой (а) и дуговой (б) решеток, образованных из круговых цилиндрических преобразователей и упругого кругового цилиндрического экрана

#### Анализ результатов численных экспериментов

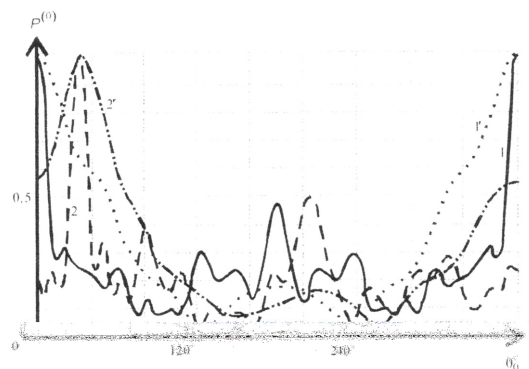
В ходе выполнения расчетов был получен обширный численный материал и произведен

его систематизированный анализ. Наиболее интересные результаты углового распределения нормированных амплитуд представлены на рис. 2-4 – для звукового давления рассеянного и полного полей, на рис. 5-6 – для радиальных перемещений поверхностей преобразователей и экрана и на рис. 7-9 – для электрических напряжений на выходе систем преобразователей и отдельных преобразователей в составе системы. При этом кривые рисунков с индексами «а» и «б» приведены соответственно для круговых и дуговых систем преобразователей. На всех рисунках, если это не оговорено особо, обозначения без штриха соответствуют частоте падающей волны 10 кГц, а со штрихом – 4 кГц.

Для обеспечения возможности сравнения характеристик преобразователей в составе системы и вне ее, что позволит определить влияние взаимодействия преобразователей в системах, имеющих экран, на параметры преобразователей, выполнены расчеты угловых зависимостей амплитуд звукового давления, радиальных перемещений поверхностей преобразователя и экрана и угловых зависимостей электрического напряжения на выходе преобразователя в присутствии упругого экрана.

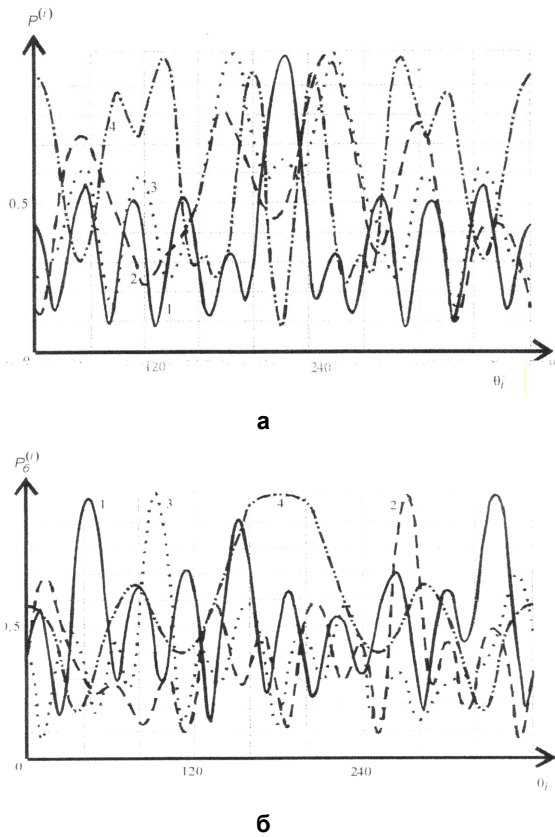


а



б

Рис. 2. Угловые зависимости нормированных акустических давлений рассеянного поля решеток преобразователей с упругим экраном на частотах  $f=10 \text{ кГц}$  и  $f=4 \text{ кГц}$  для разных углов прихода  $\alpha$  плоских волн: 1,1' –  $\alpha = 0^\circ$ ; 2,2' –  $\alpha = 30^\circ$

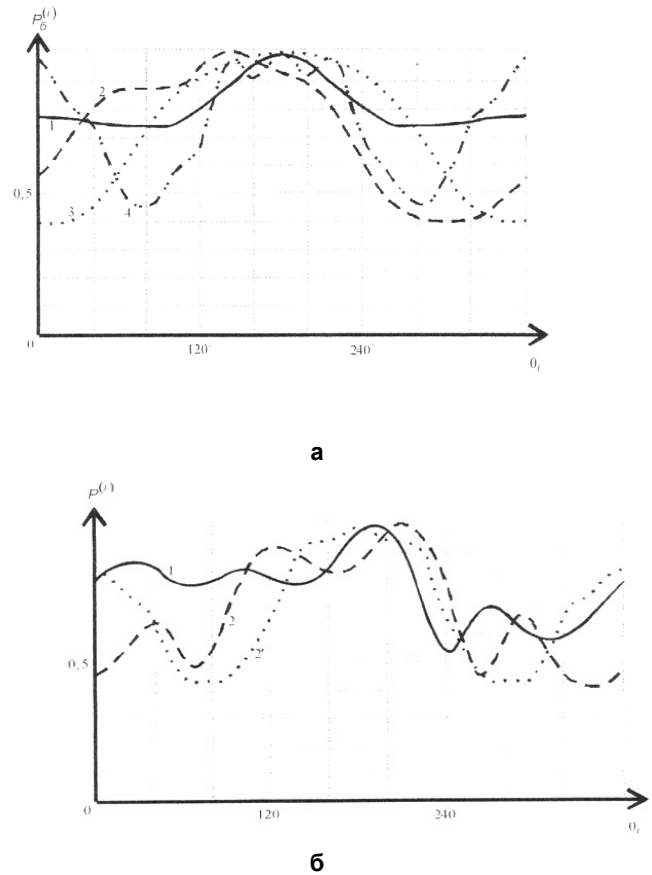


**Рис. 3.** Угловые зависимости нормализованных акустических давлений на поверхности преобразователей с номерами  $i = 1, 2, 3$  и экрана на частоте  $f = 10$  кГц для угла прихода плоской волны  $\alpha = 0^\circ$ ; 1 –  $i = 1$ ; 2 –  $i = 2$ ; 3 –  $i = 3$ ; 4 – экран

Произведем анализ полученных результатов, сопоставляя их с результатами расчета полей систем пьезокерамических преобразователей, как не имеющих экрана во внутренней полости систем [2], так и не имеющих акустического экрана мягкого и жесткого типов [3].

Сопоставление графиков рис.2 между собой и с соответствующими графиками работы [2] позволяет утверждать, что размещение внутри круговой или дуговой систем пьезокерамических цилиндрических преобразователей акустического экрана в виде полого упругого тонкостенного цилиндра не приводит, при прочих равных условиях, к существенному изменению поля рассеяния в дальней зоне систем. Как и ранее, увеличение волновых размеров рассеивающего препятствия сопровождается обострением диаграмм рассеяния систем цилиндров и образованием основного лепестка рассеяния, вытянутого по направлению падения плоских волн. Однако боковое поле в системах с упругим экраном при увеличении отношения  $f/f_0$ , где  $f_0$  - частота пульсирующих колебаний электроупругой оболочки (преобразователя), убывает значительно слабее, а в области углов,

прилегающих к направлению, откуда пришла плоская волна, - даже возрастает. При падении плоских волн вдоль оси симметрии систем преобразователей поля рассеяния также симметричны. Для других направлений прохода плоских волн симметрии рассеянного поля нет.

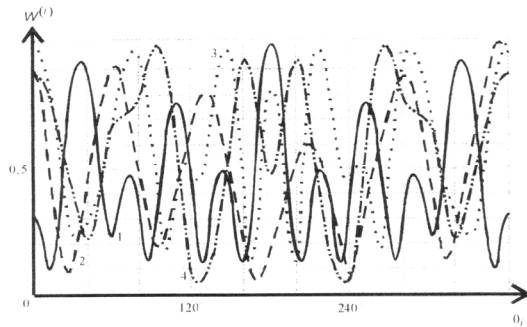


**Рис. 4.** Угловые зависимости нормализованных акустических давлений на поверхности преобразователей с номерами  $i = 1, 2, 3$  и экрана на частоте  $f = 4$  кГц для угла прихода плоской волны  $\alpha = 0^\circ$ ; 1 –  $i = 1$ ; 2 –  $i = 2$ ; 3 –  $i = 3$ ; 4 – экран

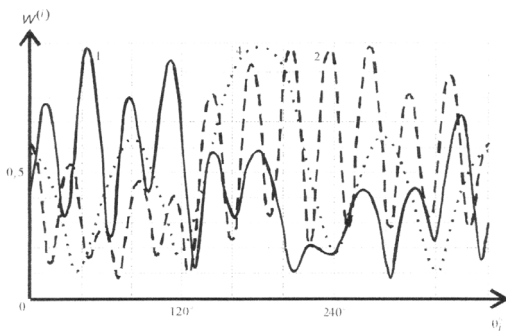
В отличие от систем преобразователей без экрана, изменение конфигурации рассеивающего препятствия, содержащего упругий акустический экран, слабо отражается на угловом распределении амплитуд рассеянного поля в дальней зоне системы. Это хорошо видно при сравнении диаграмм рассеяния круговых систем (рис.2, а), дуговых систем (рис.2, б) и одиночного преобразователя в присутствии акустического экрана в виде упругого цилиндра (рис. 10, а). При этом на частоте  $f = 4$  кГц, совпадающей с резонансной частотой нулевой моды колебаний акустического экрана в виде упругого цилиндра, диаграммы рассеяния очень близки.

Установленное в работах [2] и [3] значительное влияние взаимодействия полей, рассеянных отдельными цилиндрами в составе системы, на формирование поля системы в целом

и полей составляющих ее элементов сохраняется и в рассматриваемых случаях. При этом поле рассеяния отдельного элемента в составе системы в значительной мере определяется конфигурацией системы, количеством элементов в ней, местоположением отдельного элемента, размерами системы и элементов, частотой и направлением прохода плоских волн.



а

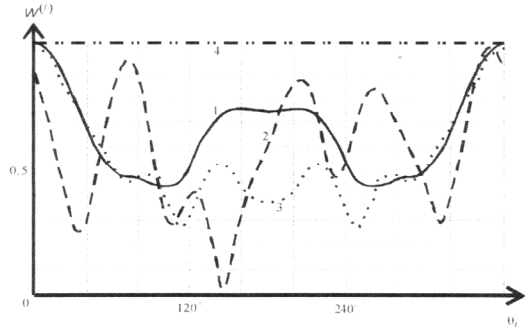


б

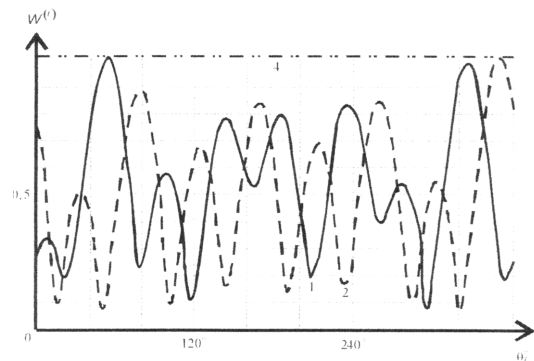
**Рис. 5. Угловые зависимости нормализованных модулей радиальных перемещений поверхностей преобразователей с номерами  $i = 1, 2, 3$  и экрана на частоте  $f = 10$  кГц для угла прихода плоской волны  $\alpha = 0^\circ$ ; 1 –  $i = 1$ ; 2 –  $i = 2$ ; 3 –  $i = 3$ ; 4 – экран**

В области низких частот (рис. 4 и рис. 10, а) амплитуды давления рассеянного поля, определенные на поверхности преобразователей, обладают сильно выраженной неоднородностью в отличие от систем без акустического экрана [2]. К тому же эта неоднородность претерпевает существенные изменения при изменении номера преобразователя. При этом максимальные амплитуды давлений рассеянного поля располагаются со стороны прихода плоских волн при любой конфигурации рассматриваемых систем. Интересно отметить, что угловое распределение давления рассеянного поля третьего преобразователя в круговой системе (рис. 4, а, кривая 3) практически совпадает с угловым распределением давления рассеянного поля на поверхности одиночного преобразователя вблизи упругого экрана (рис. 10, кривая 3; рис. 10, а, кривая 2'). Сравнение распределений давления рассеянного поля на поверхности упругого цилиндра в различных системах тел

(рис. 4, кривая 3; рис. 10, а, кривая 3') на частоте  $f = 4$  кГц, совпадающей с частотой пульсирующих колебаний упругого цилиндра, свидетельствует с одной стороны об их близком характере, а с другой – о наличии влияния конфигурации системы на поле, рассеянное упругим цилиндром.



а



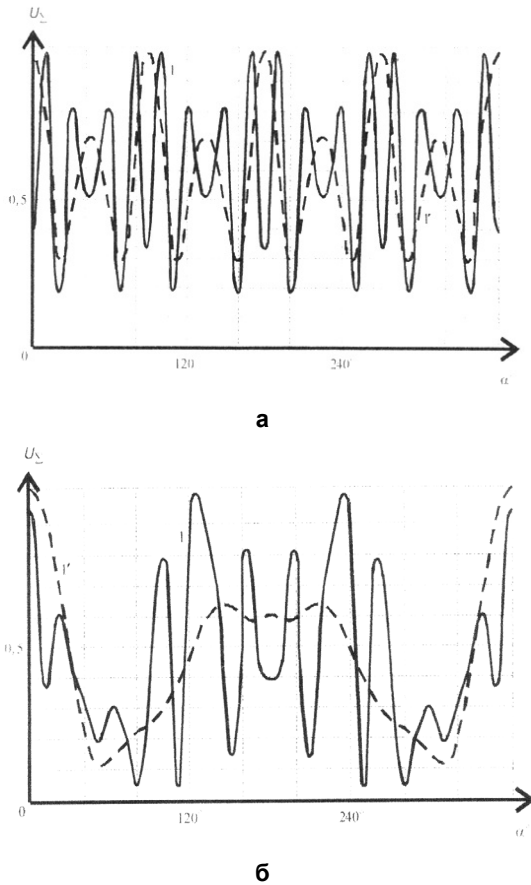
б

**Рис. 6. Угловые зависимости нормализованных модулей радиальных перемещений поверхностей преобразователей с номерами  $i = 1, 2, 3$  и экрана на частоте  $f = 4$  кГц для угла прихода плоской волны  $\alpha = 0^\circ$ ; 1 –  $i = 1$ ; 2 –  $i = 2$ ; 3 –  $i = 3$ ; 4 – экран**

С увеличением частоты падающей волны неоднородность углового распределения амплитуд давления рассеянного поля на поверхности всех цилиндров системы существенно возрастает (рис. 3) и становится такой же, как и для систем без акустического экрана [2]. На частоте пульсирующих колебаний преобразователей со стороны падения плоской волны на поверхности большинства оболочек образуются провалы в угловом распределении амплитуд давления рассеянного поля. Количество этих провалов увеличивается с ростом числа цилиндров в системе. Изменение угла прихода плоских волн сопровождается изменением картины углового распределения амплитуд рассеянного поля в ближнем поле системы.

Оценим теперь характер тех перемещений, которые испытывают оболочки в системе с упругим акустическим экраном при возбуждении их падающими плоскими волнами. Анализ кри-

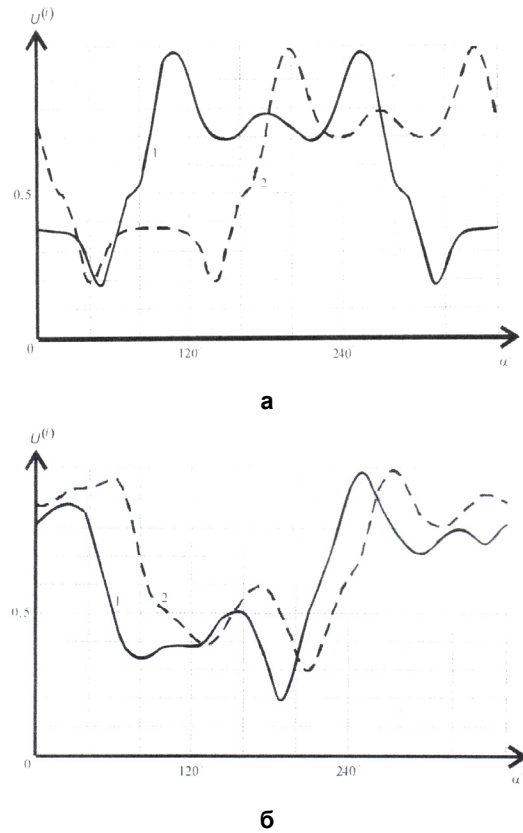
вых (рис. 5-7) и (рис. 10, б) свидетельствует о сложности тех колебательных процессов, которым подвергаются при этом оболочки системы. Как и в системах без внутренних упругих акустических экранов, обусловлено это тем, что перемещения точек поверхностей оболочек представляет собой суперпозицию двух перемещений – упругих перемещений поверхностей оболочек и поступательных перемещений оболочек в целом как «твердых» тел.



**Рис. 7.** Зависимости нормализованных электрических напряжений на выходе решеток преобразователей с упругим экраном на частотах  $f = 4$  кГц и  $f = 10$  кГц для разных углов прихода  $\alpha$  плоских волн: 1 –  $f = 10$  кГц; 1' –  $f = 4$  кГц

В области низких частот (рис. 6 и рис. 10, б) и одиночный преобразователь, вблизи упругого экрана, и преобразователи в составе круговой системы (рис. 6, а), лежащие на оси симметрии системы, при падении волн вдоль этой оси приобретают колебания осциллирующего характера с максимальной амплитудой в направлении падения плоской волны. При этом колебания всех преобразователей существенно отличаются между собой. Колебания других преобразователей в составе круговой системы, как и колебания преобразователей в дуговой решетке представляются значительно более сложными. Это вызвано тем, что в результате взаимодействия преобразователей между собой и с упру-

гим акустическим экраном, кроме составляющей осцилляций оболочек вдоль оси ОХ, возникает и вторая составляющая осцилляций вдоль оси ОУ и обе составляющие оказываются сравнимыми по величине.



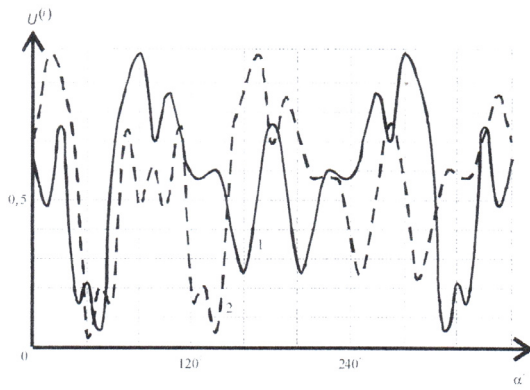
**Рис. 8.** Зависимости нормализованных электрических напряжений на выходе одиночных преобразователей с номерами  $i = 1, 2$  в составе решеток с упругим экраном на частоте  $f = 4$  кГц от угла прихода  $\alpha$  плоских волн: 1 –  $i = 1$ ; 2 –  $i = 2$

Особый интерес представляет график колебаний упругого цилиндрического экрана на частоте 4 кГц. Поскольку эта частота совпадает с частотой пульсирующих колебаний упругой оболочки, график этих колебаний имеет вид прямой линии (рис. 6, кривые 4).

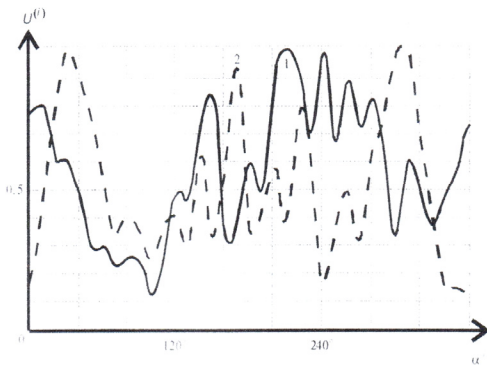
Увеличение частоты падающей волны (рис. 5) приводит к усложнению картины перемещений оболочек. Это усложнение проявляется в увеличении количества пиков максимальных перемещений и увеличении глубины провалов между этими пиками. При этом электроупругие оболочки и упругая оболочка-экран имеют близкий характер перемещений. Изменение угла прихода плоских волн не приводит к упрощению картины перемещений ни в одном из диапазонов частот.

Рассмотрим теперь зависимости напряжений на выходе, как системы преобразователей, так и одиночного преобразователя в составе систем от углов прихода плоских волн.





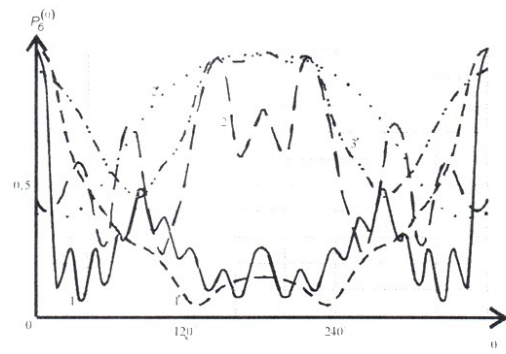
а



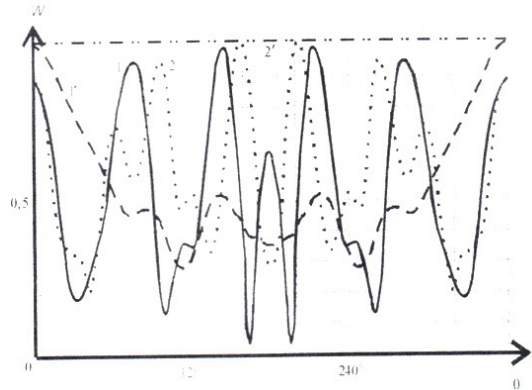
б

Рис. 9. Зависимости нормализованных электрических напряжений на выходе одиночных преобразователей с номерами  $i = 1, 2$  в составе решеток с упругим экраном на частоте  $f = 10$  кГц от угла прихода  $\alpha$  плоских волн: 1 –  $i = 1$ ; 2 –  $i = 2$

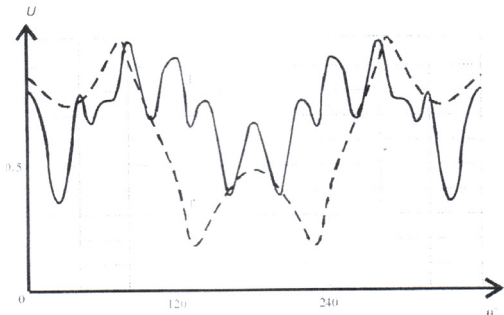
Анализ кривых (рис. 7) и (рис. 10, в) показывает, что размещение акустического экрана в виде упругой цилиндрической оболочки внутри круговой или дуговой системы не приводит к существенному изменению ее направленных свойств по сравнению с системой без экрана. В области частот пульсирующих колебаний преобразователей направленность и круговой и дуговой систем характеризуется крайней неравномерностью. Такая же неравномерность имеет место и при переходе к приему сигналов круговой системой на частоте пульсирующих колебаний упругого экрана. Переход же от круговой к дуговой решетке преобразователей на этой частоте существенно изменяет направленные свойства системы преобразователей – со стороны выпуклости дуги формируется основной, сравнительно острый лепесток характеристики направленности, а со стороны упругого экрана – уровень лепестка, противостоящего основному, меньше последнего почти в два раза. Таким образом, введение в состав системы упругого акустического экрана позволяет системе в области частот пульсирующих колебаний экрана приобрести свойства однонаправленности.



а



б



в

Рис. 10. Угловые зависимости нормализованных акустических давлений (а) в дальнем поле  $P_A^0$  (кривые 1) и на поверхности преобразователя  $D_a$  (кривые 2), модулей радиальных перемещений поверхностей (б) преобразователя (кривые 1) и экрана (кривые 2) и электрических напряжений (в) на выходе преобразователя для одиночного преобразователя, расположенного вблизи упругого экрана при угле падения  $\alpha = 0^\circ$  (а, б) плоских волн: 1,2 –  $f = 10$  кГц; 1',2' –  $f = 4$  кГц

Анализ кривых (рис. 8 и рис. 10, в) показывает, что размещение преобразователей вблизи упругого акустического экрана приводит к возникновению ярко выраженной неоднородности в угловой зависимости электрического напряжения на выходе каждого преобразователя – преобразователи в присутствии упругого экрана на частоте его пульсирующих колебаний приобретают свойство однонаправленности.

При этом зона основного лепестка характеризуется большой угловой протяженностью и в  $3\div 3,5$  раза превышает угловую протяженность зоны тыльного лепестка. Влияние взаимодействия преобразователей в круговой системе проявляется в уменьшении уровня тыльного лепестка. При этом в силу симметрии системы характеристики направленности всех преобразователей в составе системы одинаковы. Переход от круговой к дуговой системе преобразователей сопровождается нарушением симметрии характеристик направленности преобразователей в составе систем (рис. 8, б). Однако эти искажения симметричности оказываются меньшими, чем в системах без упругого экрана [2]. С увеличением частоты входящей плоской волны направленные свойства преобразователей в системе теряются. Увеличение частоты обуславливает повышение влияния вторичных волн, многократно отраженных от преобразователей и упругого экрана системы, в формировании волновых полей и систем, и преобразователей, что и проявляется в значительной изрезанности их характеристик направленности.

Интересно сопоставить между собой физические характеристики полей рассматриваемых систем с внутренними акустическими экранами в виде локально- реагирующих [2] и упругих тел. Сопоставление угловых зависимостей нормализованных звуковых давлений в дальнем поле одиночного преобразователя, расположенного вблизи податливого экрана [3] и одиночного преобразователя, расположенного вблизи упругого экрана (рис. 10, а, кривые 1 и 1') показывает, что вблизи частоты механического резонанса упругого экрана рассматриваемые угловые зависимости преобразователей вблизи упругого и вблизи податливого экрана близки между собой. При дальнейшем изменении частот, а также степени жесткости акустических экранов возникают существенные различия.

*Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»*

## Выводы

Анализ физических полей, формируемых криволинейными системами преобразователей с внутренним акустическим экраном в виде упругого цилиндра, и сопоставление их с такими же полями криволинейных систем преобразователей без внутренних экранов и с внутренними экранами в виде локально- реагирующих податливых цилиндрических тел позволяет выявить и количественно определить значительную частотную зависимость влияния взаимодействия между преобразователями и упругим акустическим экраном на поля, формируемые как системами, так и преобразователями в составе систем. При этом учитывая частотно-зависимые импедансные свойства акустического экрана в виде упругого цилиндра влияние указанного выше вида взаимодействия наиболее сильно проявляется в области резонансных частот, как преобразователей, так и экрана.

## Литература

1. *Кандрачук И.В.* Взаимодействие плоских акустических волн с криволинейной системой пьезокерамических цилиндрических преобразователей, во внутренне полости которой расположен электроупругий цилиндрический экран // *Электроника и связь.* – 2012.
2. *Лейко А.Г., Ткаченко В.П., Шамарин Ю.Е.* Подводные акустические антенны. – К.: Аванпостприм, 2000. – 320 с.
3. *Кандрачук И.В.* Физические закономерности взаимодействия плоской акустической волны с криволинейными решетками, образованными из цилиндрических преобразователей и податливого экрана // *Электроника и связь.* – 2007. – №5. – С. 77–83.

*Поступила в редакцию 7 сентября 2012 г.*