

## Акустические приборы и системы

УДК 534.232

А.Г. Лейко, д.-р., техн. наук., З.Т. Гусак, И.В. Кандрачук, канд. техн. наук

Государственное предприятие «Киевский научно-исследовательский институт гидроприборов», ул. Сурикова, 3, г. Киев, 03035, Украина.

### Свойства механических полей экранированных гидроакустических излучателей силовой конструкции в зависимости от параметров экрана

*Выполнен численный анализ свойств механических полей цилиндрических излучателей силовой конструкции, образованных из пьезокерамической оболочки с окружной поляризацией и акустически мягкого экрана в виде незамкнутого кольцевого слоя конечной толщины. Сопоставительный анализ частотных свойств излучателей позволил выявить ряд тонких эффектов в формировании механических полей экранированных излучателей в зависимости от типа силового исполнения конструкции и параметров их экранов. Библ. 7, рис. 5.*

**Ключевые слова:** механические поля; цилиндрический экранированный излучатель; окружная поляризация; силовая конструкция.

#### Введение

Гидроакустические цилиндрические пьезокерамические преобразователи нашли широкое применение в подводной электроакустической аппаратуре [1, 2]. Обладая рядом достоинств, они имеют один существенный недостаток, который состоит в том, что для придания преобразователям свойства одностороннего излучения или приёма их конструкции должны быть снабжены акустическими экранами. Естественно, что образуя единую колебательную систему в преобразователях с экранами, последние, наряду с другими конструктивными элементами и особенностями этих устройств, такими как тип исполнения конструкции (силовая или компенсированная), состав пьезокерамики и тип её поляризации, диаметр преобразователя и толщина его пьезокерамической оболочки, оказывают существенное влияние на формирование физических полей устройствами такого типа. В общем виде аналитические соотношения, позволяющие определить количественные характеристики этого влияния в зависимости от вида перечисленных конструктивных особенностей построения гидроакустических цилиндрических

пьезокерамических преобразователей с экраном, получены в работах [3, 4]. Некоторые конкретные аспекты этого влияния для одного из интересных для практики случаев, когда акустический экран вырождается в тонкую ленту, расположенную в диаметральной плоскости пьезокерамического цилиндрического излучателя, исследовались в работе [5]. Представляется целесообразным, основываясь на теоретических результатах работ [3, 4], с единых методических позиций выполнить системные исследования количественных характеристик влияния конкретных конструктивных особенностей построения гидроакустических преобразователей с экранами на их физические поля.

Целью данной статьи является изучение свойств механических полей экранированных цилиндрических излучателей силовой конструкции в зависимости от характеристик входящих в их состав экранов.

#### Результаты исследований.

Изучим механические поля гидроакустических цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой конструкции с акустически мягким экраном (рис. 1) в зависимости от формы и размеров экрана. Будем полагать, что цилиндрический излучатель 1 со средним радиусом  $r_0$  и толщиной  $h$  пьезокерамической оболочки выполнен в виде секционированной конструкции, реализующей окружную поляризацию. Внутренняя полость конструкции излучателя радиусом  $r_1$  вакуумирована или заполнена газом с плотностью  $\rho_1$  и скоростью звука  $c_1$  при нормальном атмосферном давлении. Акустический экран 2 представляет собой незамкнутый кольцевой слой толщиной  $r_3 - r_2$  с углом раскрытия  $2\varphi_0$ . Излучатель с экраном расположен в жидкой среде с плотностью  $\rho$  и скоростью звука  $c$ .

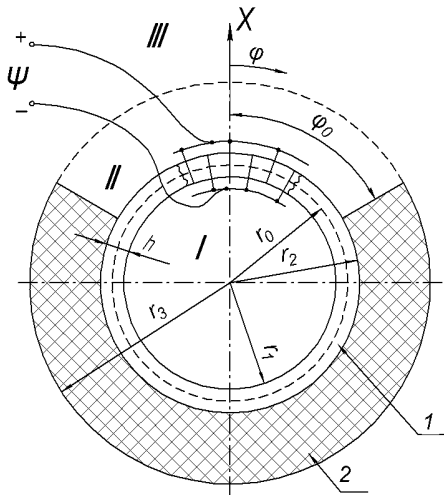


Рис. 1. Изображение нормального сечения экранированного цилиндрического излучателя

В качестве исследуемых характеристик примем частотные зависимости амплитуд и фаз радиальных колебательных скоростей центральных неэкранированных поверхностей излучателей с экранами, спектральный состав их мод колебаний и угловые распределения амплитуд и фаз радиальных скоростей в целом и на отдельных модах колебаний.

Расчёты численных характеристик механических полей проводились с использованием аналитических соотношений, полученных в работе [3], для тех же параметров излучателей и экранов, что и в работе [5]. При этом принималось, что  $r_4 = r_3$ . В качестве исходных данных были выбраны: для пьезокерамики – ЦТБС-3 с параметрами: плотность  $\rho_k = 7210 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ; пьезо-

модуль  $d_{33} = 286 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н}}$ ; модуль упругости

$C_{33}^E = 13,6 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ ; для оболочки излучателя –

$r_0 = 0,068 \text{ м}$ ,  $h = 0,008 \text{ м}$  и количество призм  $N = 48$ ; для акустического экрана –

$r_3 - r_2 = 0,05 \text{ м}$  и  $0,5 \text{ м}$ ;  $\varphi_0 = 30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ; для газа – воздух с  $\rho_1 = 1,27 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  и

$c_1 = 330 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ ; для жидкой среды – вода с

$\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  и  $c = 1500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Электрическое

напряжение возбуждения принималось равным  $\psi_0 = 200 \text{ В}$ .

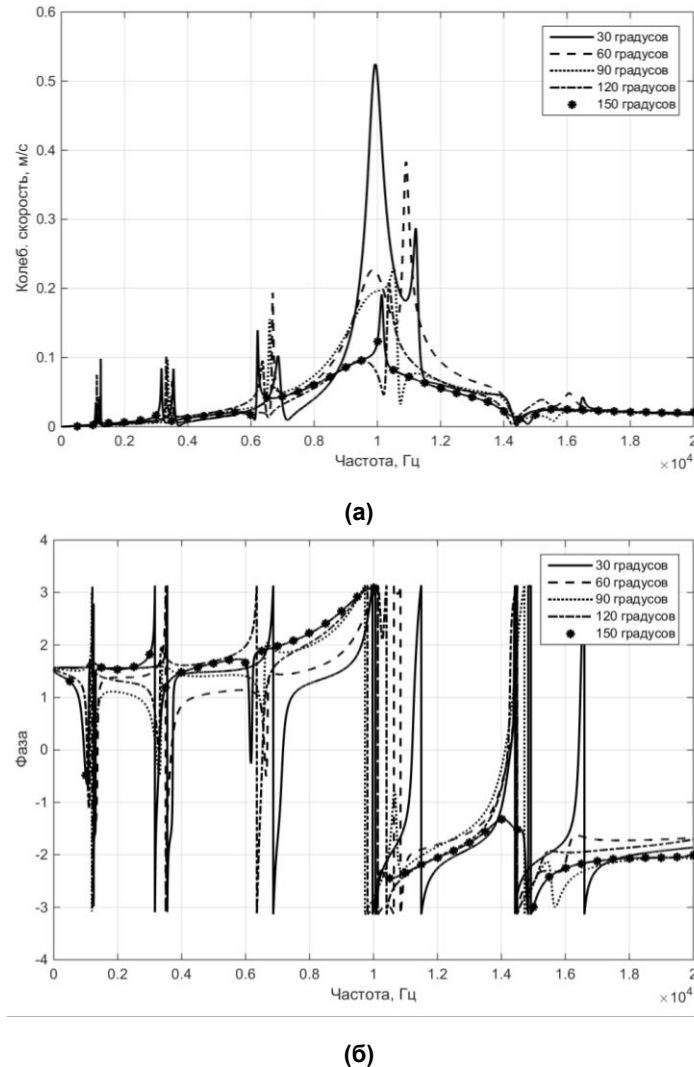
Анализ частотных зависимостей амплитуд радиальных колебательных скоростей вакуумированного экранированного излучателя при разных углах  $2\varphi_0$  экранирования (рис. 2а) позволяет выделить в них три частотные области: низкочастотную область  $f < 8000 \text{ Гц}$ , резонансную область  $8000 \text{ Гц} < f < 12000 \text{ Гц}$  и высокочастотную область  $f > 12000 \text{ Гц}$ . В низкочастотной области колебательные скорости излучателей с разными углами экранирования достаточно быстро убывают с понижением частоты и характеризуются двумя существенными особенностями. Первая особенность состоит в том, что колебательные скорости начинают мало отличаться между собой для разных излучателей. Это не является неожиданным и связано с тем, что с понижением частоты быстро растёт собственный механический импеданс пьезокерамической оболочки излучателей, поскольку в этой области он имеет упругий характер. В то же время импеданс излучения падает, поскольку волновой радиус излучателей уменьшается. Вторая особенность связана с появлением ряда новых узкополосных резонансных пиков, собственные частоты и амплитуды которых определяются углом раскрыва акустически мягкого экрана излучателей. При этом частоты резонансных пиков не слишком сильно отличаются между собой, но имеют тенденцию к снижению по мере увеличения угла  $2\varphi_0$  раскрыва экрана.

Более сложной представляется зависимость амплитуды новых резонансных пиков от угла раскрыва экрана. В целом с увеличением угла раскрыва  $2\varphi_0$  амплитуды резонансных пиков скоростей колебаний возрастают при увеличении резонансных частот, достигая при больших величинах  $2\varphi_0$  значений, составляющих 3/4 амплитуды радиальной скорости колебаний на частоте основного резонанса пьезокерамической оболочки излучателей. Вместе с тем при некоторых углах раскрыва ( $\varphi_0 = 120^\circ$ ) амплитуды скоростей самых низкочастотных колебаний превышают или близки по величине к амплитуде скорости более высокочастотного дополнительного резонанса.

Установленные спектральные свойства излучателей в низкочастотной области имеют довольно четкое физическое объяснение. В случае акустически мягких стенок, ограничивающих раскрыв акустического экрана излучателя, изменение объёма жидкости между ними на относительно низких частотах происходит за счёт

перемещения слоя жидкости практически как единого целого. Поэтому реакция слоя жидкости, заполняющего пространство между стенками экрана, на движение пьезокерамической оболочки излучателя несет чисто массовый ха-

рактер и, следовательно, новые собственные частоты экранированного излучателя падают. При этом оказывается, что описанный эффект может иметь довольно существенное значение при рассмотрении колебаний пьезокерамических оболочек в воде.



**Рис. 2.** Графики частотных зависимостей амплитуды (а) и фазы (б) радиальной колебательной скорости центра свободной от экрана поверхности вакуумированного излучателя при разных формах акустического экрана:  $\varphi_0 = 30^0, 60^0, 90^0, 120^0, 150^0$

На высоких частотах (в высокочастотной области) уменьшение колебательных скоростей с ростом частоты также обусловлено увеличением собственного механического импеданса пьезокерамической оболочки излучателя, который в этой зоне имеет инерционный характер. Здесь также имеет место тенденция к выравниванию радиальных колебательных скоростей излучателей с разными углами раскрытия  $2\varphi_0$  экранов. Однако это выравнивание не является таким быстрым, как в низкочастотной области.

Это обусловлено тем, что действительная часть импеданса излучателя растет с частотой.

В резонансной области собственный механический импеданс пьезокерамической оболочки излучателей сравним с их импедансами излучения. Кроме того здесь существенную роль начинает играть реакция окружающей среды. В этой области механические характеристики излучателей с разными углами экранирования существенно отличаются между собой. В частности, амплитуды колебательных скоростей на

одной и той же частоте могут отличаться в 2-10 раз. При этом значения частот, при которых фазовая характеристика принимает значения нуля (рис. 2б), у всех излучателей разные. Особенностью частотной зависимости колебательной скорости экранированных излучателей в резонансной области является появление глубокого провала в собственной резонансной области их пьезокерамической оболочки, делящего эту область на две неравные части. Величина провала зависит от величины угла экранирования  $2\varphi_0$ . При этом по мере возрастания значения  $2\varphi_0$  резонансная часть слева от провала уменьшается, а правая часть возрастает и обостряется.

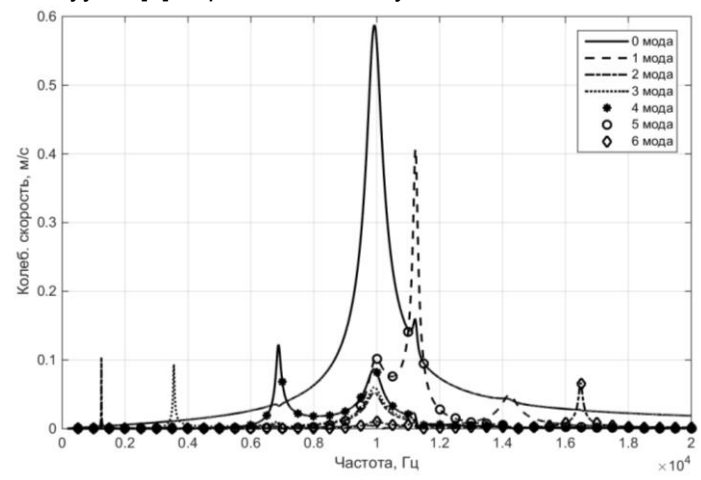
Анализ фазовых характеристик колебательных скоростей излучателей различного конструктивного исполнения (рис. 2б) показывает многократное пересечение ими оси абсцисс. Частоты, на которых это происходит, являются собственными частотами системы «пьезокерамическая оболочка – акустически мягкий незамкнутый кольцевой слой конечной толщины – внешняя среда». Таким образом рассматриваемое конструктивное исполнение экранированных излучателей сопровождается расширением и обогащением спектра их собственных частот.

Для выяснения физических причин описанного поведения экранированных излучателей обратимся к рис. 3. Анализ приведенных кривых говорит о том, что нарушение радиальной симметрии круговой цилиндрической пьезокерамической оболочки путем введения в состав излучателя акустически мягкого экрана в виде незамкнутого кольцевого слоя конечной толщины даже при выбранном однородном способе электрического возбуждения оболочки приводит к появлению ряда последующих мод колебаний, амплитуды колебательных скоростей которых сравнимы с амплитудой скорости колебаний пульсирующей моды. Это означает, что в данном случае происходит эффективное перераспределение энергии, «закачиваемой» в экранированные излучатели на нулевой моде, между последующими формами колебаний. При больших углах экранирования (рис. 3а) нарушения радиальной симметрии излучателей малы и скорость колебаний нулевой моды существенно превышает скорость колебаний пьезокерамической оболочки на других модах, хотя количество вновь генерируемых мод колебаний остаётся тем же, как и для других углов экранирования. С

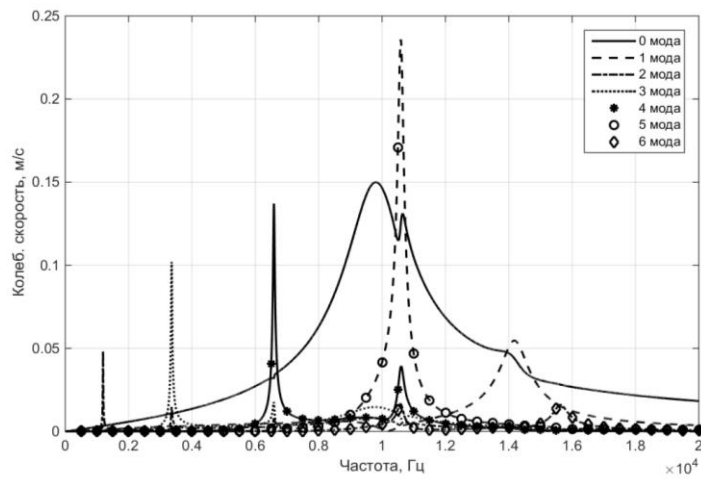
уменьшением угла экранирования излучателей радиальная несимметричность излучателей возрастает, что обуславливает больший уровень перекачки энергии нулевой моды в другие моды колебаний. Это проявляется в существенном снижении амплитуды скорости пульсирующих колебаний (более чем в 6 раз) и возрастании амплитуд скоростей колебаний на более высоких модах. При этом особо интересным является сильная «раскачка» излучателей на второй, третьей и четвертой модах в области низких частот и на первой моде в резонансной и высокочастотной областях. Сравнение кривых рис. 2 и рис. 3 показывает, что в низкочастотной области первый, второй и третий дополнительные резонансы радиальной колебательной скорости излучателя определяются генерацией соответственно второй, третьей и четвертой мод колебаний пьезокерамической оболочки. В резонансной области причиной появления глубокого провала в области основного резонанса вакуумированной пьезокерамической оболочки является генерация в частично экранированном излучателе мощной осциллирующей моды колебаний, фаза которой противоположна фазе пульсирующей моды. Изменение конфигурации экрана отражается как на частотах, так и на амплитудах колебательных скоростей вновь генерируемых мод. Это объясняется тем [6], что при связанных продольно-изгибных колебаниях цилиндрической оболочки для каждой формы колебаний, начиная с первой, существуют две собственные частоты, соответствующие принципиально разным напряженно-деформированным состояниям оболочки и принадлежащие двум ветвям решений дисперсионного уравнения – низкочастотной и высокочастотной. Для низкочастотной ветви радиальные колебания больше тангенциальных ( $w \gg u$ ), а окружные напряжения в срединной поверхности оболочки малы. Для этой ветви при заданном значении  $h/r_0$  в исследуемом диапазоне лежит несколько собственных частот, причем собственная частота колебаний оболочки с  $n=1$  формально равна нулю. В этом случае для всех частот оболочки с экраном механические импедансы излучателей имеют характер массы. Именно взаимодействие массы оболочки, присоединенной массы внешней жидкости и упругостей пьезокерамической оболочки и объёма жидкости, находящейся в «чашечке», образованной стенками экрана, и создает предпосылки

для появления в излучателях специфических резонансов с относительно низкими частотами, отсутствующими в спектре собственных частот оболочки излучателей в вакууме [7]. При этом,

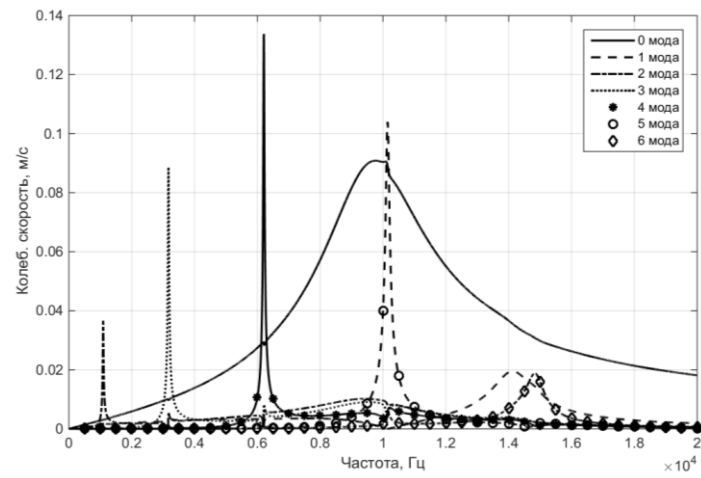
как следует из сопоставления кривых рис. 3, увеличение размеров «чашечки» сопровождается снижением резонансных частот соответствующих мод колебаний.



(а)



(б)



(в)

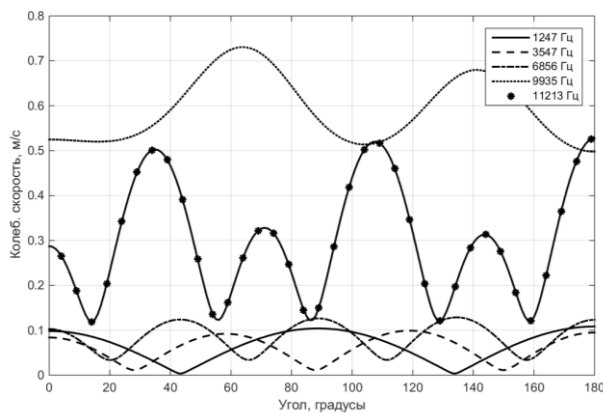
Рис. 3. Графики частотных зависимостей амплитуд радиальных скоростей мод колебаний от 0 до 6 (соответственно кривые 1-7) центра свободной от экрана поверхности вакуумированного излучателя при разных формах акустического экрана:  $\varphi_0 = 30^\circ$  (а),  $90^\circ$  (б),  $150^\circ$  (в)

Это связано, в частности, с увеличением общей податливости объема жидкости в «чашечке». Большому снижению резонансных частот экранированных излучателей способствует также и акустическая мягкость стенок экрана.

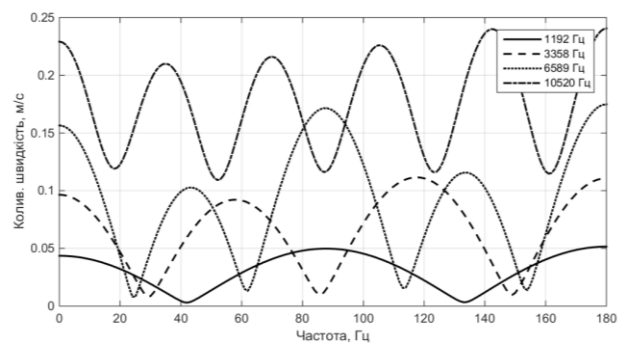
Высокочастотная ветвь колебаний отвечает состояниям излучателей со значительными окружными напряжениями вдоль срединной поверхности и условию  $w \ll u$ . Частоты, принадлежащие верхней ветви, лежат выше частот пульсирующих колебаний оболочки излучателей.

Проанализируем теперь угловые распределения амплитуд и фаз колебательных скоро-

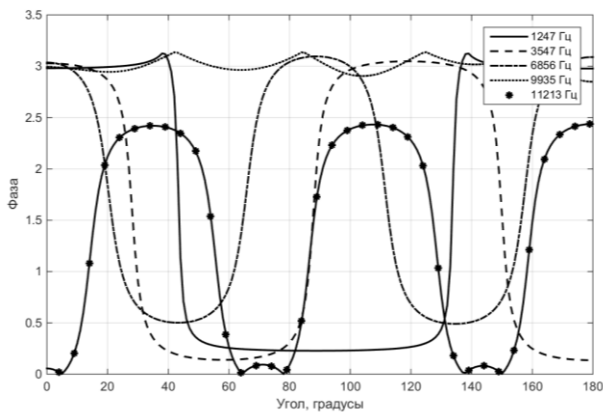
стей излучателей с экранами разной конфигурации на отдельных модах (рис. 4). Совместное рассмотрение кривых рис. 2-4 позволяет установить ряд интересных фактов. Во-первых, в низкочастотной области среди энергетически активных мод отсутствует осциллирующая мода, в то время как в резонансной и высокочастотной областях её проявление максимально и существенно превалирует над другими модами. Во-вторых, угловые распределения амплитуд и фаз радиальных скоростей всех мод характеризуются значительной неоднородностью, причем с уменьшением угла экранирования эта неоднородность возрастает.



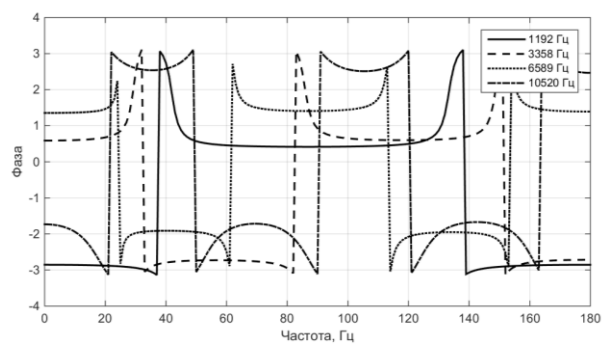
(а)



(в)

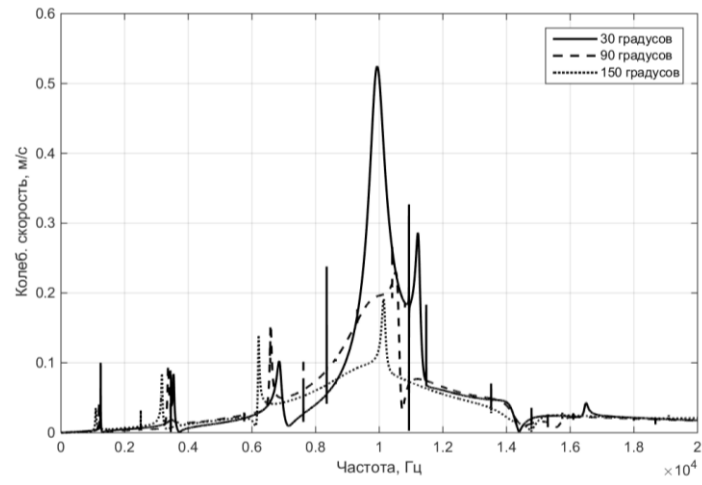


(б)

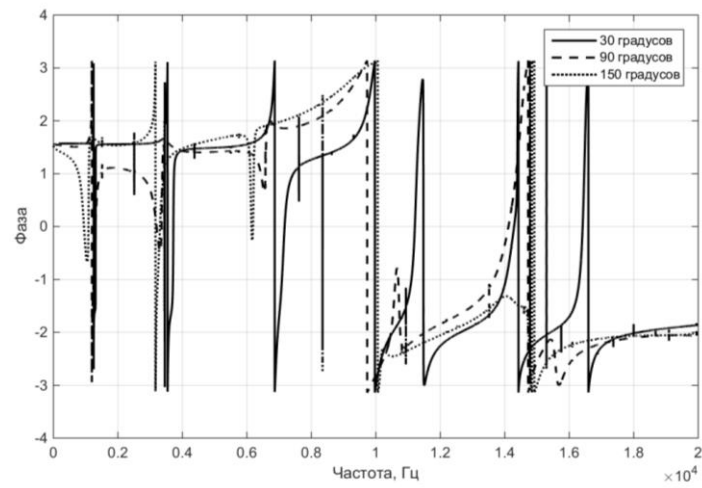


(г)

**Рис. 4.** Графики угловых распределений амплитуд (а, в) и фаз (б, г) радиальных колебательных скоростей поверхности вакуумированного излучателя с экраном при разной форме акустического экрана:  $\varphi_0 = 30^\circ$  (а, б),  $90^\circ$  (в, г) на частотах дополнительных резонансов в низкочастотной и резонансной областях



(а)



(б)

Рис. 5. Графики частотных зависимостей амплитуд (а) и фаз (б) радиальных колебательной скорости центра свободной от экрана поверхности заполненного воздухом излучателя с экраном при разных формах акустического экрана:  $\varphi_0 = 30^\circ$  (кр.1),  $90^\circ$  (кр.2),  $150^\circ$  (кр.3)

В завершение исследований проанализируем механические поля, которые формируются экранированными цилиндрическими пьезокерамическими излучателями, внутренняя полость которых не вакуумирована, а заполнена каким-либо газом, например, воздухом, при нормальном атмосферном давлении. Это ещё один из вариантов практической реализации силовой конструкции экранированных излучателей. От ранее рассмотренных вакуумированных излучателей они отличаются наличием в их внутренней полости упругой среды, в которой может распространяться звук. Естественно, что излучение звука экранированной пьезокерамической оболочкой не только во внешнюю среду, но и в замкнутый объем её внутренней полости, долж-

но отразиться на свойствах механических полей экранированных излучателей.

Анализ частотных зависимостей амплитуд (рис. 5а) и фаз (рис. 5б) колебательных скоростей заполненных газом экранированных излучателей и сравнение их с аналогичными зависимостями (рис. 2) вакуумированных излучателей позволяет установить следующее. Во-первых, общий ход частотных зависимостей силовых конструкций цилиндрических излучателей обоих типов идентичен как по форме, так и по количественным характеристикам. Во-вторых, генерирование энергетически активных мод и обусловленных ими дополнительных резонансов сохраняется полностью во всем частотном диапазоне. В-третьих, заполнение

внутреннего объема пьезокерамической оболочки экранированных излучателей упругой средой в виде газа обуславливает дальнейшее расширение спектра резонансных частот излучателей, обусловленных резонансами объема внутренней полости оболочки. В-четвертых, в отличие от дополнительных резонансов, формируемых энергетически активными модами, генерируемыми в экранированных излучателях благодаря нарушению радиальной симметрии нагрузки внешней среды, новые резонансы, обусловленные наличием внутренней среды, возбуждаются при радиально симметричной нагрузке и являются узкополосными. Различия в величинах резонансных полос частот дополнительных и новых резонансов объясняется существенным различием в импедансах нагрузок на радиально возбуждаемую пьезокерамическую оболочку со стороны внешней и внутренней упругих сред.

### Выводы

Численный анализ свойств механических полей цилиндрических экранированных излучателей силовой конструкции с акустически мягкими экранами, выполненными в виде незамкнутых кольцевых слоев конечной толщины, позволил выявить ряд практически интересных эффектов.

Наиболее важными из них являются возможности существенного расширения и обогащения спектра собственных частот излучателей рассматриваемого типа. Эти возможности определяются физическими причинами двух типов. Первой причиной является нарушение радиальной симметрии излучения, обусловленное введением в состав излучателей акустически мягких экранов в виде незамкнутого кольцевого слоя конечной толщины. Благодаря ей в излучателе, кроме собственной формы колебаний пьезокерамической оболочки, появляются последующие энергетически эффективные моды, возникающие благодаря перераспределению энергии, «закачиваемой» в излучатель на пульсирующей моде, между последующими формами колебаний. Вторая причина, присущая только излучателям силовой конструкции с запол-

ненной газом внутренней полостью, состоит в возникновении резонансов внутреннего объема экранированных излучателей при его радиально симметричном возбуждении. Различия в частотных полосах всех резонансов определяются конфигурацией и размерами акустических экранов и величинами импедансов внешней и внутренней сред.

### Список использованных источников

1. Лейко А.Г., Шамарин Ю.Е., Ткаченко В.П. Подводные акустические антенны. – К.: Аванпостприм, 2000 – 320 с.
2. Подводные электроакустические преобразователи (расчет и проектирование): справочник /под ред. В.В. Богородского. – Л.: Судостроение, 1983 – 248 с.
3. Гусак З.Т., Лейко А.Г. Физические поля гидроакустической антенны, состоящей из углового рупора и пьезокерамического излучателя с окружной поляризацией // Электроника и связь. - 2014 – №1 – с. 102-108.
4. Гусак З.Т., Лейко А.Г. Поле излучения углового рупорной антенны с пьезокерамическим преобразователем с радиальной поляризацией // Электроника и связь. – 2014 - №2 – с. 75-81.
5. Гусак З.Т., Кандрачук И.В., Лейко А.Г., Мельниченко М.А. Акустические свойства цилиндрической пьезокерамической гидроакустической антенны с плоским экраном в диаметральной плоскости // Электроника и связь. – 2015 - №2 – с. 71-78.
6. Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацыпура В.Т. Волновые задачи акустики. – К.: Интерсервис, 2013 – 572 с.
7. Лейко А.Г., Нижник А.И., Старовойт Я.И. Акустические свойства цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции с продольным и поперечным пьезоэффектами // Электроника и связь. - 2013 – №6 – с. 62-73.

Поступила в редакцию 05 октября 2015 г.



---

УДК 534.232

**А.Г. Лейко**, д.-р. тех. наук., **З.Т. Гусак**, **І.В. Кандрачук**, канд. техн. наук

Державне підприємство «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів»,  
вул. Сурікова, 3, м. Київ, 03035, Україна.

## **Властивості механічних полів екранованих гідроакустичних випромінювачів силової конструкції в залежності від параметрів екрану**

*Виконано чисельний аналіз властивостей механічних полів циліндричних випромінювачів силової конструкції, утворених з п'єзокерамічної оболонки з окружною поляризацією і акустично м'якого екрану у вигляді незамкнутого кільцевого шару кінцевої товщини. Порівняльний аналіз частотних властивостей випромінювачів дозволив виявити ряд тонких ефектів у формуванні механічних полів екранованих випромінювачів в залежності від типу силового виконання конструкції і параметрів їх екранів. Бібл. 7, рис. 5.*

**Ключові слова:** механічні поля; циліндричний екранований випромінювач; окружна поляризація; силова конструкція.

UDC 534.232

**A. Leiko**, Dr.Sc., **Z. Gusak**, **I. Kandrachuk**, Ph.D.

State Enterprice Kiyv Scientific Research Institute of Hydrodevices,  
st. Surikova, 3, Kiyv, 03035, Ukraine.

## **The properties of mechanical fields of shielded sonar radiators with power structure depending on parameters of shield**

*The numerical analysis of mechanical fields of cylindrical antennas formed of cylindrical radiator with power structure, which formed of piezoceramic shell with a circumferential polarization and acoustically soft flat shield which are non closed circumferential shell with finite thickness was obtained. Comparative analysis of the frequency properties of radiators allowed to establish a number of subtle effects in the formation of mechanical fields of shielded radiators depending on the type of their structure and parameters of their shields. References 7, figures 5.*

**Keywords:** mechanical fields; cylindrical shielded radiator; circumferential polarization; power structure.

### **References**

1. *Leiko, A. G., Shamarin, U. E., Tkachenko, V. P.* (2000). Underwater acoustic antennas. Kiyv. Avanpostprim. P. 320. (Ukr)
2. *Bohorodskii, V. V., Zubarev, L. A., Korenin, E. A., Yakushev, V. I.* (1983). Underwater electroacoustic converters. Calculation and design. Handbook. Leningrad. Sudostroenie. P 248 (Rus)
3. *Gusak, Z. T., Leiko, A. G.* (2014). Physical fields of hydroacoustic antenna consisting of the angle of the horn and the piezoceramic transducer with a circumferential polarization. Electronics and Communications. Vol. 19, №1, pp. 102-108. (Rus)
4. *Gusak, Z. T., Leiko, A. G.* (2014). Radiation field angled horn antenna with a piezoceramic transducer with radial polarization. Electronics and Communications. Vol. 19, №2, pp. 75-81. (Rus)
5. *Gusak, Z. T., Leiko, A. G., Kandrachuk, I. V., Melnichenko, M. A.* (2015). Acoustic properties of cylindrical piezoceramic sonar antenna with flat baffle located in the diametral plane. Electronics and Communications. Vol. 20, №2, pp. 71-78. (Rus)
6. *Grinchenko, V. T., Vovk, I. V., Matsipura, V. T.* (2013). Wave problems of acoustic. Kyiv. Interservis. P 572. (Rus)
7. *Leiko, A. G., Nyzhnyk, A. I., Starovoyt, Y. I.* (2013). Acoustic properties of cylindrical piezoceramic emitters with power and compensated design with longitudinal and transverse piezoelectric effect. Electronics and Communication. Vol. 18, №6, pp. 62-73. (Rus)