

УДК 534.232

А.Г. Лейко, д.-р., тех. наук., **З.Т. Гусак**, **И.В. Кандрачук**, канд. тех. наук, **М.А. Мельниченко**
Государственное предприятие «Киевский научно-исследовательский институт гидроприборов»,
ул. Сурикова, 3, г. Киев, 03035, Украина.

Акустические свойства цилиндрической пьезокерамической гидроакустической антенны с плоским экраном в диаметральной плоскости

Проведен численный анализ акустических свойств цилиндрической антенны с плоским акустически мягким экраном, расположенным в диаметральной плоскости её излучателя, выполненного в виде силовой или компенсированной конструкций. Сопоставительный анализ частотных свойств звуковых полей и углового распределения полей в дальней зоне антенны позволил установить ряд тонких эффектов в формировании полей, зависящих как от типа конструктивного исполнения излучателя антенны, так и от размеров её акустического экрана. Библ. 3, рис. 7.

Ключевые слова: звуковые поля; цилиндрическая антенна с экраном; силовая и компенсированная конструкции.

Введение

В практической гидроакустике достаточно широкое применение нашли угловые рупорные антенны, излучатели которых выполнены в виде круговых цилиндрических пьезокерамических преобразователей силовой или компенсированной конструкций и располагаются в устье рупора [1]. Предельным случаем вырождения таких антенн являются однонаправленные цилиндрические антенны, образованные из кругового цилиндрического излучателя и плоского акустического экрана, расположенного в диаметральной плоскости излучателя непосредственно вблизи него (рис.1).

Такие антенны оказываются полезными, когда требуется обеспечить сравнительно равномерное излучение в широком секторе углов при малом уровне излучения в некотором заданном (обычно тыльном) направлении и при сохранении максимальной излучающей поверхности цилиндрического источника излучения. Помимо этого таким антеннам присуще ещё одно положительное свойство – их импеданс незначительно меняется по сравнению с импедансом обычного незранированного цилиндрического излучателя. Кроме того, при соответствующих величинах диаметра преобразователя, такая антенна может успешно выполнять функции од-

нонаправленного элемента антенных решеток, обладающих малым гидродинамическим сопротивлением [1]. На сегодняшний день в опубликованной литературе отсутствуют данные по изучению свойств физических полей таких антенн, а тем более при различном конструктивном исполнении источников звука в них.

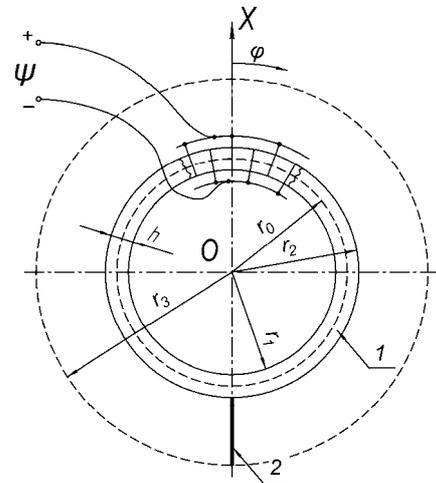


Рис. 1. Сечение гидроакустической антенны с экраном

В то же время с публикацией работы [2] появилась возможность в строгой постановке с единых методических позиций произвести сопоставительный анализ физических характеристик антенн рассматриваемого типа в зависимости от вида конструктивного исполнения излучателя и физических свойств акустического экрана. Это позволит при выполнении проектных работ четко аргументировать обоснование выбора того или иного варианта технической реализации такой однонаправленной антенны. Этой цели и посвящена данная работа.

Результаты исследований

Рассмотрим частотные свойства звуковых полей, создаваемых гидроакустической антенной (рис. 1), образованной из кругового цилиндрического пьезокерамического излучателя 1 с окружной поляризацией и плоского акустического экрана 2. Внутренняя полость излучателя 1 может быть вакуумированной, заполненной воз-

духом или жидкой средой с плотностью ρ_1 и скоростью звука c_1 . В конструктивном отношении такие заполнения соответствуют силовым (вакуум и воздух при нормальном атмосферном давлении) и компенсированным конструкциям излучателей [1]. Окружная поляризация обеспечивается образованием цилиндрической оболочки из жестко склеенных между собой N пьезокерамических призм, электрически включенных параллельно. К электродам призм приложен гармонический сигнал вида $\psi = \psi_0 e^{-i\omega t}$ частотой ω . Плоский экран 2 акустически мягкого типа выполнен в виде ленты, расположенной в диаметральной плоскости излучателя вдоль всей его длины и имеющей ширину $r_3 - r_2$ и малую толщину. Антенна располагается в среде с плотностью ρ и скоростью звука c .

Частотные свойства таких антенн будем изучать в виде зависимостей, во-первых, амплитуд звукового давления на поверхности излучателя антенны в центральной неэкранированной части его от частоты излучаемого сигнала и, во-вторых, от вида конструктивного исполнения этого излучателя. Кроме того, произведем сопоставительный анализ частотных свойств антенны рассматриваемого типа с экраном и только её излучателя, т.е. такой же антенны, но без акустического экрана. Это позволит количественно подтвердить или опровергнуть ряд тех достоинств уголкового рупорной антенны, о которых говорилось во введении.

С этой целью расчеты численных характеристик звуковых полей проводились с использованием аналитических соотношений, полученных в работе [2], для тех же параметров излучателей, которые были выбраны в работе [3].

При этом отметим, что рассматриваемый случай построения антенны является предельным, когда $\varphi_0 = \pi$ и уголкового рупора вырождается в ленту, толщина которой стремится к нулю.

В качестве пьезокерамики использовался состав ЦТБС-3 с параметрами:

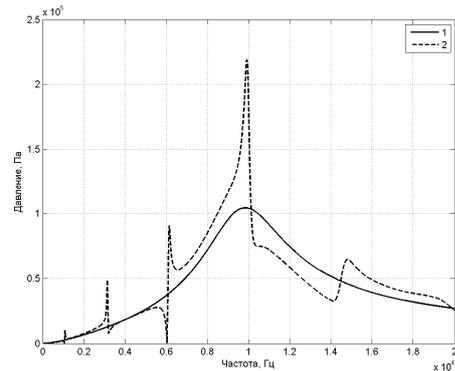
- плотность $\rho_k = 7210 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
- пьезомодуль $d_{33} = 286 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н}}$;
- модуль упругости $C_{33}^E = 13,6 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

Средний радиус оболочки излучателя принимался равным $r_0 = 0,068 \text{ м}$ при толщине стенки $h = 0,008 \text{ м}$ и количестве призм $N = 48$. Акустически мягкий экран располагался по направлению $\varphi_0 = 180^\circ$ и имел ширину $r_3 - r_2 = 0$ (вариант 1), $r_3 - r_2 = 0,05 \text{ м}$ (вариант 2), $r_3 - r_2 = 0,5 \text{ м}$ (вариант 3). Параметры воздуха и воды прини-

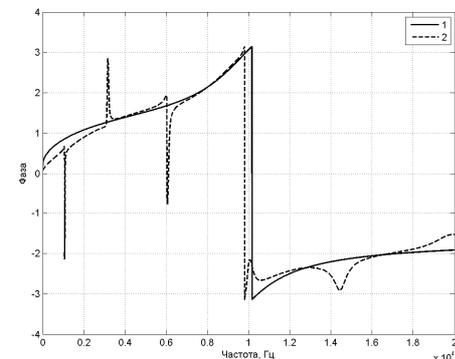
мались соответственно равными $\rho_1 = 1,27 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

$$c_1 = 330 \frac{\text{м}}{\text{с}} \text{ и } \rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, c = 1500 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Результаты расчетов частотных зависимостей амплитуд и фаз давления звукового поля на внешней поверхности излучателя в центре его открытой поверхности для антенн рассматриваемого типа и силового исполнения их излучателей представлены на рис. 2 и 4, а также их пространственное распределение представлено на рис. 3.



а)



б)

Рис. 2. Графики частотных зависимостей амплитуды (а) и фазы (б) звукового давления при вакуумировании излучателя для антенн без экрана (кривая 1) и с шириной экрана $r_3 - r_2 = 0,05 \text{ м}$ (кривая 2)

Сопоставление приведенных кривых показывает, что при исполнении излучателей в виде конструкций силового типа частотные свойства давления звукового поля во внешней области антенны с плоским экраном в диаметральной плоскости излучателя (кривые 2) существенно отличаются от таковых при отсутствии экрана (кривые 1). При этом степень отличия не зависит от размеров экрана. Для вакуумированного

излучателя (рис. 2) при отсутствии экрана частотная характеристика амплитуды давления антенны представляет собой гладкую кривую с основным резонансом, определяемым длиной средней окружности излучателя и физическими свойствами материала его пьезокерамической оболочки и соответствует приведенной в [3, 4, 5].

Введение в состав антенны с вакуумированным излучателем акустически мягкого экрана даже в таком упрощенном виде существенно изменяет амплитудно-частотную характеристику антенны (кривая 2). Она теряет свой гладкий характер, приобретая множество резонансных пиков. При этом изменение ширины экрана $r_3 - r_2$ практически не отражается на амплитудно-частотной характеристике антенны.

Анализ фазо-частотных характеристик (рис.2б) антенн с вакуумированным излучателем и различной шириной экрана показывает, что они многократно пересекают ось частот, что указывает на многократную смену характера полного механического импеданса антенны с упругого на инерционный и обратно. Поскольку частота, где фазовая характеристика пересекает ось абсцисс, есть собственная частота системы «вакуумированная оболочка – акустический экран – окружающая среда», можно утверждать, что введение в состав антенны кроме излучателя плоского акустического экрана и расположение его в диаметральной плоскости излучателя приводит к расширению и обогащению спектра собственных частот рассматриваемой антенны. Интересными представляется ряд фактов. Первый из них состоит в том, что это обогащение спектра происходит в большей мере в области частот до основного резонанса излучателя, где импеданс излучателя имеет упругий характер. Второй факт связан с тем, что

на основной резонанс излучателя накладывается ещё и резонанс всей рассматриваемой системы, следствием чего является превращение довольно широкополосной резонансной области излучателя в узкополосную резонансную область антенны с таким излучателем.

Физически появление описанных резонансов объясняется тем, что введение в состав антенны акустически мягкого плоского экрана и его своеобразное геометрическое расположение изменяют силу реакции окружающей среды, действующей на излучатель антенны, в частности, величину его присоединенной массы. Действительно, размещение в диаметральной плоскости излучателя плоского акустического экрана приводит к образованию на поверхности излучателя открытой резонансной полости, основанием которой является внешняя поверхность излучателя, а стенками – плоские поверхности экрана. Её упругие свойства и присоединенная масса воды, а также упругие свойства и масса излучателя и формируют новую систему резонансных частот антенны. Обратим внимание на ещё одну особенность рассматриваемой антенны. Сравнивая кривые 1 и 2 (рис. 2), можно утверждать, что размещение плоского экрана в диаметральной плоскости излучателя обуславливает повышение энергетической эффективности антенны по сравнению с её излучателем. Это обусловлено тем, что введение в состав антенны акустически мягкого экрана даже в виде «флажка» изменяет (рис. 3) характер распределения давления на поверхности излучателя (кривая 1) обнуляя его на линии стыка экрана с излучателем, и увеличивает его величину с противоположной стороны. Естественно, что при отсутствии экрана (кривая 2) такое распределение является однородным.

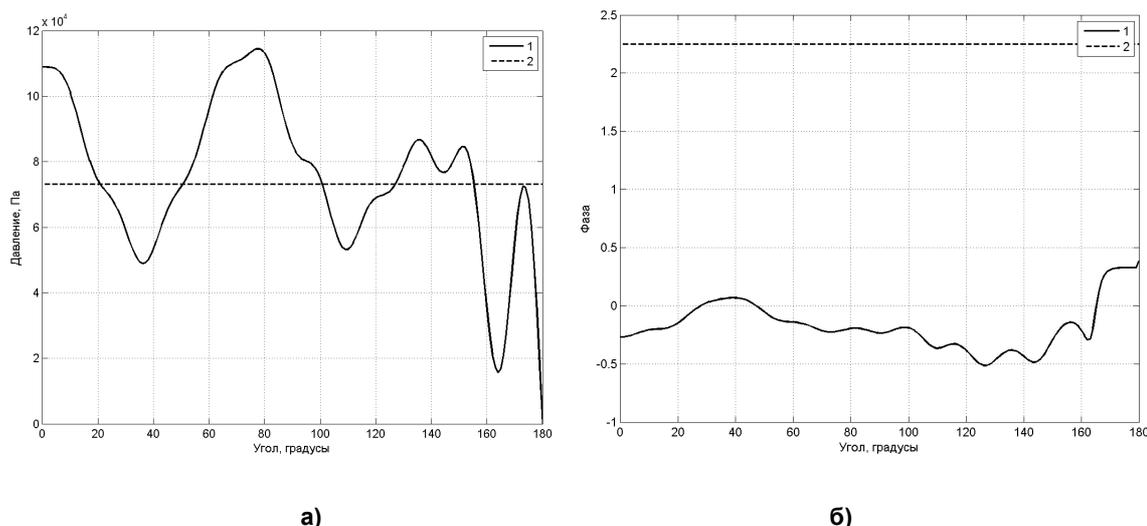


Рис. 3. Графики угловых распределений амплитуды (а) и фазы (б) звукового давления на поверхности излучателя антенны (кривая 1) с шириной экрана $r_3 - r_2 = 0,05$ м на частоте резонанса излучателя и без экрана (кривая 2)

Заполнение внутренней полости излучателя антенны рассматриваемого типа воздухом при нормальном атмосферном давлении (рис. 4) сохраняет частотную характеристику такой антенны, которая имеет место при вакуумированном излучателе, но дополняет её множеством узкополосных локальных резонансов. Их появлению антенна обязана резонансным свойствам среды во внутренней полости её излучателя. Отметим при этом, что резонансные частоты

внутренней полости для антенн с экраном и без него совпадают, но амплитуды давлений существенно отличаются между собой. Таким образом, рассмотрение излучаемой антенны как единой системы «внутренняя среда – пьезокерамическая оболочка – акустический экран – внешняя среда» позволяет установить все собственные частоты такой системы и обогатить тем самым спектр собственных частот антенны силовой конструкцией.

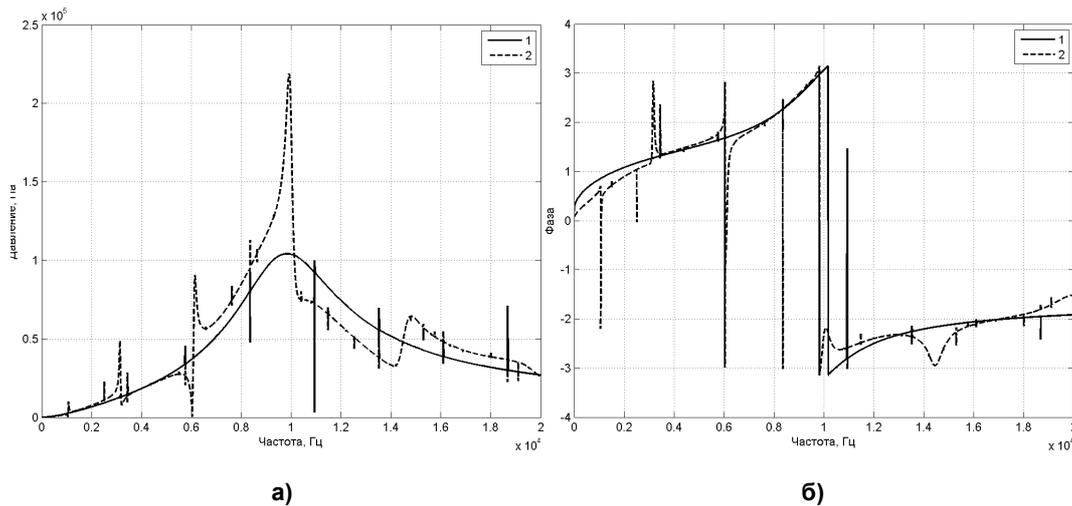


Рис. 4. Графики частотных зависимостей амплитуды (а) и фазы (б) звукового давления при заполнении внутренней полости излучателя воздухом при нормальном атмосферном давлении для антенн без экрана (кривая 1) и с шириной экрана $r_3 - r_2 = 0,05$ м (кривая 2)

Рассмотрим теперь частотные свойства антенны с плоским экраном при выполнении её в виде конструкции компенсированного типа. Соответствующие результаты расчетов представлены на рис. 5. Сравнение их между собой и с частотными характеристиками антенн силовой конструкции показывает существенную зависимость частотных свойств антенн рассматриваемого типа и от вида конструктивного исполнения, и от свойств среды заполнения внутренней полости излучателя. Заполнение внутренней полости излучателя жидкой средой полностью изменяет форму частотных характеристик амплитуд и фаз давления компенсированной конструкции антенны по сравнению с антеннами силовой конструкции. При незначительном

уменьшении (до 20%) относительного волнового сопротивления внутренней среды излучателя $\frac{\rho_1 c_1}{\rho c}$ частотные характеристики амплитуд и фаз давления мало отличаются между собой. Изменение $\frac{\rho_1 c_1}{\rho c}$ вдвое сопровождается появлением новых резонансных пиков в области высоких частот и существенным изменением частотных характеристик в области основного резонанса излучателя антенны. При этом, как и в случае построения антенны в виде силовой конструкции, увеличение ширины $r_3 - r_2$ экрана даже на порядок практически не влияет на рассматриваемые частотные зависимости.

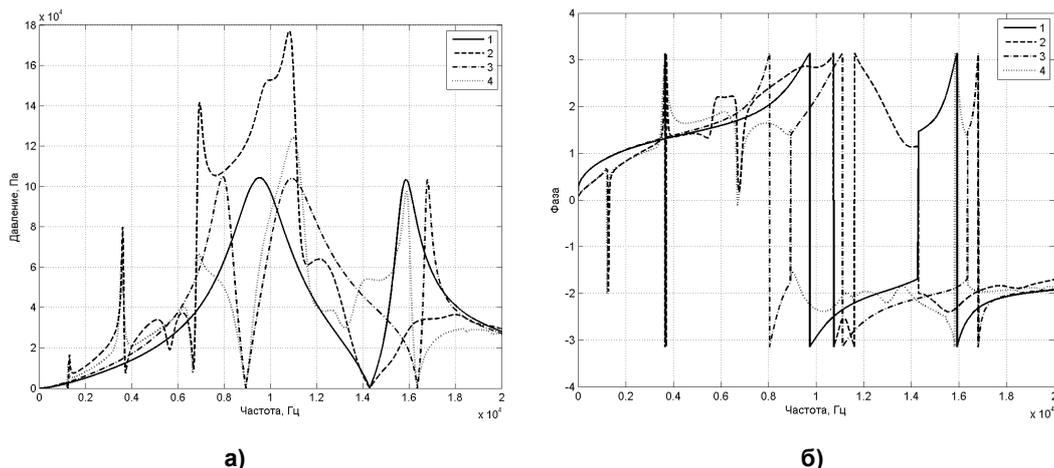


Рис. 5. Графики частотных зависимостей амплитуды (а) и фазы (б) звукового давления антенны компенсированной конструкции при $\frac{\rho_1 c_1}{\rho c} = 1$ (кривые 1 и 2), $\frac{\rho_1 c_1}{\rho c} = 0,5$ (кривые 3 и 4), отсутствии экрана (кривые 1 и 3) и при ширине экрана $r_3 - r_2 = 0,05 \text{ м}$ (кривые 2 и 4)

Интересным представляется анализ характера изменения частотной зависимости амплитуды давления в точках, лежащих на положительной полуоси ОХ (рис. 1), при их удалении от излучателя антенны (рис. 6). Анализ приведенных кривых показывает, что по мере удаления этих точек от поверхности излучателя форма частотной характеристики сглаживается, а величина амплитуды, как и следовало ожидать, уменьшается.

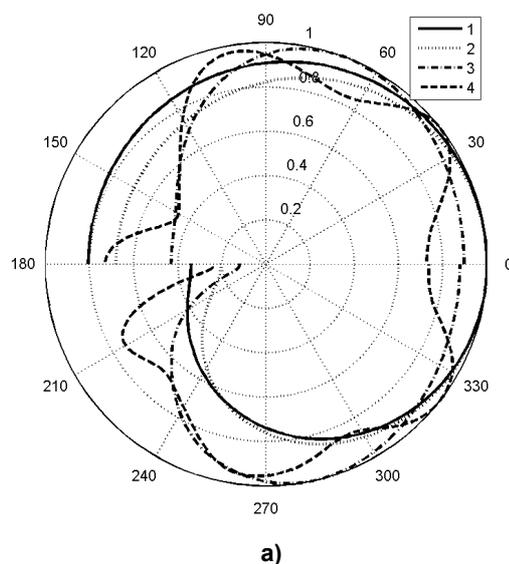
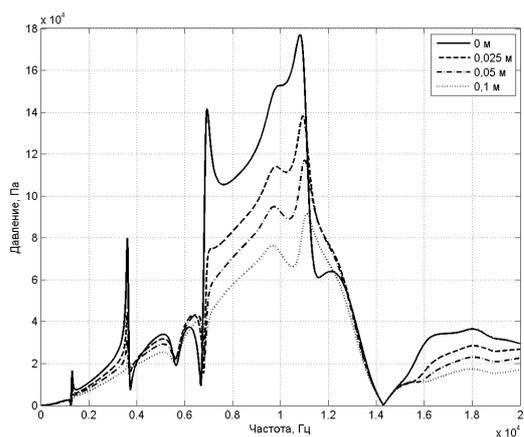
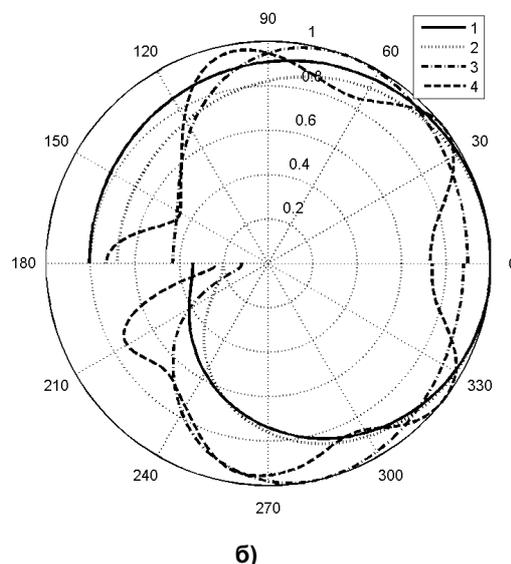


Рис. 6. График частотной зависимости амплитуды звукового давления при заполнении водой внутренней полости излучателя, ширине экрана $r_3 - r_2 = 0,05 \text{ м}$ и удалении точки наблюдения от поверхности антенны



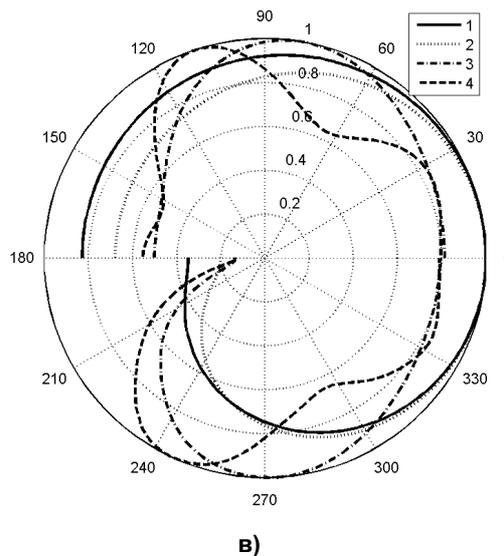


Рис. 7. Характеристики направленности антенны с плоским экраном при разных условиях заполнения внутреннего объема излучателя – вакуум (а), воздух (б), жидкость (в), для разных рабочих частот 200 Гц (кривые 1), 1000 Гц (кривые 2), 5000 Гц (кривые 3), 10000 Гц (кривые 4) и разных размеров экрана $r_3 - r_2 = 0,05 \text{ м}$ (верхние половины), $r_3 - r_2 = 0,5 \text{ м}$ (нижние половины)

Обратимся теперь к направленным свойствам антенн, образованных из цилиндрического излучателя и плоского экрана, размещенного в его диаметральной плоскости. Результаты соответствующих расчетов представлены на рис.7. Их анализ показывает, что в области низких частот (меньше $0,05f_0$, где f_0 - резонансная частота нулевой моды колебаний излучателя) независимо от приемлемых для практики размеров экрана антенна с экраном, как и антенна без экрана является практически ненаправленной (кривые 1) для любого конструктивного исполнения излучателя. По мере дальнейшего увеличения частоты (до $0,2f_0 \div 0,3f_0$) со стороны экрана появляется некоторое снижение (кривые 2) уровня излучения. Начиная с частот, больших $0,4f_0 \div 0,5f_0$, в широком секторе углов (кривые 3 и 4) наблюдается эффективное излучение звука антенной и только в зоне углов, прилегающих к экрану, уровень поля начинает быстро снижаться. Увеличение размеров акустического экрана (нижние половины рис. 7) приводит к значительным изменениям направленных свойств антенн, особенно в диапазоне частот $0,1f_0 \div 10f_0$. При этом изменение величины отношения $\frac{\rho_1 c_1}{\rho c}$ в пределах от 1 до 0,3 в ан-

теннах компенсированной конструкции незначительно отражается на характеристиках направленности антенн (кривая 4, рис. 7в). Анализ направленных свойств антенн с плоскими экранами, конструкции излучателей которых выполне-

ны по силовому и компенсированному типам, показывает, что эти свойства практически не зависят от их конструктивного исполнения.

Выводы

Численный анализ частотных свойств цилиндрической антенны с плоским акустически мягким экраном, расположенным в её диаметральной плоскости, позволил установить, что введение в состав антенны плоского экрана и расположение его описанным образом позволяют существенно расширить и обогатить спектр резонансных частот такой антенны даже при вакуумировании её внутренней полости. Заполнение воздухом её излучателя ещё более обогащает спектр резонансных частот антенны узкополосными резонансами. Переход от силовых к компенсированным конструкциям излучателей антенн рассматриваемого типа сопряжен с существенным расширением практически всех резонансных областей антенн. В то же время установлено, что введение в состав антенны акустически мягкого экрана придает антенне новое свойство – однонаправленность излучения в широком диапазоне частот, а её направленные свойства практически мало зависят от типа конструктивного исполнения излучателя антенны с экраном.

Список использованных источников

1. Дідковський В.С., Порошин С.М., Лейко О.Г., Лейко А.О., Дрозденко О.І. Конструювання

- електроакустичних приладів і систем для мультимедійних акустичних технологій. – Харків: 2013. – 390 с.
2. Гусак З.Т., Лейко О.Г. Физические поля гидроакустической антенны, состоящей из углового рупора и пьезокерамического излучателя с окружной поляризацией // *Электроника и связь*. - 2014 – №1 – с. 102-108.
 3. 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.
 4. Коржик А.В. Амплитудно-частотные характеристики некоторых форм колебаний пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности // *Акустичний вісник*. – 2009 – Т. 12, – №3 – с. 33-40.
 5. Коржик А.В. Амплитудно-частотные характеристики некоторых форм колебаний пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности // *Акустичний вісник*. – 2009 – Т. 13, – №4 – с. 29-33.

Поступила в редакцию 10 февраля 2015 г.

УДК 534.232

А.Г. Лейко, д.-р. тех. наук., **З.Т. Гусак**, **І.В. Кандрачук**, канд. тех. наук, **М.А. Мельніченко**
Державне підприємство «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів»,
вул. Сурікова, 3, м. Київ, 03035, Україна.

Акустичні властивості циліндричної п'єзокерамічної гідроакустичної антени з плоским екраном в діаметральній площині

Проведено чисельний аналіз акустичних властивостей циліндричної антени з плоским акустично м'яким екраном, розміщеним в діаметральній площині її випромінювача, виконаного у вигляді силової чи компенсованої конструкції. Порівняльний аналіз частотних властивостей звукових полів і кутового розподілення полів в дальній зоні антени дозволив встановити ряд тонких ефектів у формуванні полів, що залежать як від типу конструктивного виконання випромінювача антени, так і від розмірів її акустичного екрана. Бібл. 3, рис. 7.

Ключові слова: фізичні поля; циліндрична антена з екраном; силова та компенсована конструкції.

UDC 534.232

A.G. Leiko, Dr.Sc., **Z.T. Gusak**, **I.V. Kandrachuk**, Ph.D., **M.A. Melnichenko**
State Enterprise Kiyv Scientific Research Institute of Hydrodevices,
st. Surikova, 3, Kiyv, 03035, Ukraine.

Radiation field angled horn antenna with a piezoceramic transducer with radial polarization

The numerical analysis of the acoustic properties of a cylindrical antenna with a flat acoustically soft baffle located in the diametral plane of its transmitter, made in the form of power or compensated structures was performed. Comparative analysis of the frequency characteristics of the sound fields and the angular distribution of the fields in the far field of the antenna allowed us to establish a number of subtle effects in the formation of fields depending on both the type of embodiment the transmitter of antenna and the size of the acoustical baffle. References 3, figures 7.

Keywords: physical fields; cylindrical antenna with baffle; piezoelectric transducer; radial polarization; power and compensated design.

References

1. *Didkovskiy V. S., Poroshyn S. M., Leiko A. G., Leiko A. A., Drozdenko O.I.* (2013), "Construction of electroacoustic instruments and systems for multimedia acoustic technology". Kharkov. P. 390. (Ukr)
2. *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 Communication*. Vol. 19, №1, pp. 102-108. (Rus)
3. *Leiko A.G., Dr.Sc., 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)
4. *Korzhik A.V.* (2009), «Amplitude-frequency characteristics of some waveforms piezoceramic cylindrical sound receivers at various kinds elektrodivovaniya under bondage». *Akustichny visnyk*. Vol.12, No 3. pp.33 – 40. (Rus)
5. *Korzhik A.V.* (2009), «Phase-frequency characteristics of some waveforms piezoceramic cylindrical sound receivers at various kinds elektrodivovaniya under bondage». *Akustichny visnyk*. Vol.13, No 4. pp.29 – 33. (Rus)