

УДК 534.232

З.Т. Гусак, А.Г. Лейко, д-р.тех.наук

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

## Поле излучения уголковой рупорной антенны с пьезокерамическим преобразователем с радиальной поляризацией

Рассмотрена гидроакустическая антенна, отражатель которой выполнен в виде акустически мягкого уголкового рупора, а источником звука является пьезокерамический цилиндрический преобразователь с радиальной поляризацией. Внутренняя полость преобразователя заполнена упругой средой, что характерно для преобразователей и силовой, и компенсированной конструкций. Задача излучения звука такой антенной в «сквозной» постановке решена с использованием методов связанных полей и частичных областей. Все физические поля антенны представлены в виде разложений в ряды Фурье, коэффициенты которых определяются в результате совместного решения дифференциальных уравнений, описывающих электроупругие колебания пьезокерамического преобразователя и волновые процессы в акустических средах, контактирующих с ним. Задача сведена к решению бесконечной системы линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов разложений. Библ. 7, рис. 1.

**Ключевые слова:** физические поля, уголковая рупорная антенна, пьезокерамический преобразователь, радиальная поляризация.

### Введение

Рупорные антенны относятся к тем гидроакустическим устройствам, в состав которых входят отражающие звук элементы и электроакустические преобразователи [1]. В зависимости от вида конструкции отражателя различают уголковые и конические рупорные антенны. Уголковая антенна является одной из наиболее распространенных рупорных гидроакустических антенн. Она состоит из уголкового рупора 1 и размещенного в его горле электроакустического преобразователя 2, обычно цилиндрического типа (рис. 1). Тыльная часть преобразователя обычно также покрывается отражающим звук материалом 3. В зависимости от рабочей глубины погружения рупорной антенны её экранирующие элементы могут быть выполнены из акустически мягкого (например, звукоотражающие резины 10087 или 51-1415) или акустически жесткого (например, чугун) материалов. Под

воздействием гидростатического давления акустически мягкий материал сжимается, приобретая определенную жесткость, и может рассматриваться как материал с конечной звукопрозрачностью [3, 4].

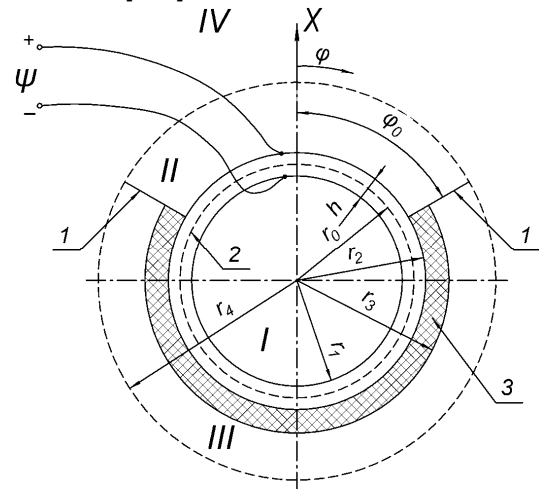


Рис. 1. Изображение нормального сечения уголковой антенны

В качестве преобразователей в основном используются пьезокерамические оболочки с поперечной или окружной поляризацией [2]. В конструктивном плане, в зависимости от рабочей глубины рупорной антенны, внутренняя полость гидроакустических преобразователей может быть вакуумирована, заполнена газом или жидкостью. В первых двух случаях такие конструкции называются силовыми, в третьем случае – компенсированными. Естественно, что в зависимости от вида пьезоэффекта, использованного в преобразователе, типа конструктивного исполнения преобразователя и характера акустических свойств экранирующих конструкций параметры рупорной гидроакустической антенны будут приобретать определенные, может быть даже существенные отличия. Выяснение этих обстоятельств требует глубоких систематизированных исследований свойств физических полей, участвующих в формировании звуковых полей рупорными гидроакустическими антеннами.

Данная работа имеет целью изучить влияние поляризации, а именно, радиальной поля-

ризации, на свойства физических полей излучающей рупорной уголкового гидроакустической антенны.

### Постановка задачи

Определим поле излучения уголкового рупорной гидроакустической антенны (рис. 1). Уголкового рупора  $1$  с углом раскрытия  $2\varphi_0$  и толщиной стенок рупора  $\delta$ , а также тыльный экран  $3$  преобразователя выполнены из акустически мягкого материала. Преобразователь  $2$  антенны представляет собой круговую оболочку толщиной  $h$ , на цилиндрические поверхности которой нанесены сплошные электроды. К электродам подводится электрический гармонический сигнал вида  $\psi = \psi_0 e^{-i\omega t}$  круговой частоты  $\omega$ . Внутренняя полость преобразователя заполнена упругой средой с плотностью  $\rho_1$  и скоростью звука  $c_1$ . В частном случае вакуумирования внутренней полости преобразователя  $\rho_1 c_1 \rightarrow 0$ . Гидроакустическая антенна высотой  $l$  расположена в водной среде с плотностью  $\rho$  и скоростью звука  $c$ . Обычно в плоскости продольной оси антенны формируется характеристика направленности с углом раскрытия больше  $20^\circ$ , в связи с чем  $l > \lambda$ , где  $\lambda$  – длина излучаемой антенной волны во внешней среде.

Для решения задачи введем ряд допущений. Будем полагать, что высота антенны  $l$  является бесконечно большой, толщина стенок ее рупора бесконечно мала, а акустически мягкий материал является идеальным.

Первое допущение справедливо для случая, когда  $l > \lambda$ , и влиянием торцов антенны на распределение поля в плоскости её нормального сечения можно пренебречь. Второе допущение обусловлено тем, что реальная толщина стенок рупора всегда существенно меньше длины волны  $\lambda$ . Третье допущение связано с тем, что волновое сопротивление большинства податливых экранирующих материалов в гидроакустике существенно ниже волнового сопротивления воды.

Преобразователь представляет собой тонкостенную радиально поляризованную оболочку и для описания её движения оправдано привлечение гипотез Кирхгофа-Лява. Снаружи и внутри оболочка окружена сжимаемыми идеальными средами, динамические процессы в которых можно моделировать волновым уравнением.

Свяжем с рупорной антенной ряд систем координат: прямоугольную систему  $OXYZ$ , ось  $Z$

которой направим вдоль продольной оси антенны, а ось  $X$  – вдоль биссектрисы угла раскрытия рупора; круговую цилиндрическую систему  $(r, \varphi, Z)$ , связанную с прямоугольной известными [4] соотношениями.

Методика определения поля излучения рупорной антенны состоит в совместном решении уравнений, которые описывают электроупругие колебания пьезокерамического преобразователя и волновые процессы в акустических средах, которые контактируют с преобразователем. При этом во внешней среде должны выполняться условия излучения на бесконечности, а решения в замкнутых объемах быть ограниченными при  $r \rightarrow 0$ . Исходные уравнения, описывающие движения сред, дополняются граничными условиями.

Система соотношений, описывающих электроупругие колебания тонкой радиально поляризованной пьезокерамической оболочки, включает:

уравнения движения оболочки в перемещениях [2]

$$(1 + \beta) \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial w}{\partial \varphi} - \beta \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} - \alpha \gamma \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0; \quad (1)$$

$$-\frac{\partial u}{\partial \varphi} + \beta \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} - w - \beta \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} + \frac{e_{31} r_0}{C_{11}^E} E_r^{(0)} + \frac{\alpha}{h} q_r - \alpha \gamma \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0; \quad (2)$$

уравнения вынужденной электростатики для пьезокерамики

$$\vec{E} = -\text{grad}\psi; \quad \text{div}\vec{D} = 0 \quad (3)$$

$$\text{Здесь } \beta = \frac{h^2}{12r_0^2} \left( 1 + \frac{e_{31}^2}{C_{11}^E \varepsilon_{33}^S} \right); \quad \alpha = \frac{r_0^2}{C_{11}^E}; \quad q_r -$$

гидродинамическая нагрузка, действующая на оболочку;  $u, w$  – окружная и нормальная составляющие вектора смещений точек срединной поверхности оболочки;  $e_{31}, C_{11}^E, \varepsilon_{33}^S, \gamma$  – пьезоконстанта, модуль упругости при нулевой электрической напряженности, диэлектрическая проницаемость и плотность пьезокерамики соответственно;  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$  – векторы напряженности и индукции электрического поля.

Учитывая гармоничность процессов, движение акустических сред представим в виде уравнения Гельмгольца

$$\Delta \Phi + k_j^2 \Phi = 0 \quad (4)$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\Phi$  – потенциал колебательной скорости акустического поля;  $k_i$  – волновое число  $i$ -ой среды.

Полная система исходных соотношений задачи кроме уравнений (1) – (4) включает в себя граничные условия. Однако прежде чем их сформулировать, разобьем всю область существования звукового поля рупорной антенны на ряд частичных областей, определив их границы следующим образом:

I область:  $0 \leq |\varphi| \leq \pi$ ;  $0 \leq r \leq r_1$ ;

II область:  $|\varphi| \leq \varphi_0$ ;  $r_2 \leq r \leq r_4$ ;

III область:  $\varphi_0 \leq \varphi \leq \pi$ ;  $r_3 \leq r \leq r_4$ ;

IV область:  $0 \leq |\varphi| \leq \pi$ ;  $r \geq r_4$ .

Тогда граничные условия принимают вид:

1. На поверхности оболочки:

- нормальная составляющая напряжений  $\sigma_r$  равняется внешнему акустическому давлению, взятому с противоположным знаком [2,4]

$$\sigma_r = q_r = i\omega\rho\Phi_{IV} - i\omega\rho_1\Phi_I; \quad (5)$$

- скорость нормальных смещений поверхностей оболочки равна скорости колебаний частиц упругих сред на поверхностях контакта

$$-\frac{\partial\Phi_I}{\partial r} = -\frac{\partial w}{\partial t}; \quad 0 \leq |\varphi| \leq \pi; \quad r = r_1; \quad (6)$$

$$-\frac{\partial\Phi_{II}}{\partial r} = -\frac{\partial w}{\partial t}; \quad 0 \leq |\varphi| \leq \varphi_0; \quad r = r_2; \quad (7)$$

2. На границах раздела областей:

$$\Phi_{II} = 0, \quad |\varphi| = \varphi_0, \quad r_2 \leq r \leq r_4; \quad (8)$$

$$\Phi_{III} = 0, \quad |\varphi| = \varphi_0, \quad r_3 \leq r \leq r_4; \quad (9)$$

$$\Phi_{III} = 0, \quad 0 \leq |\varphi| \leq \pi, \quad r = r_3; \quad (10)$$

$$\Phi_{IV} = \begin{cases} \Phi_{II}, & |\varphi| \leq \varphi_0, \quad r = r_4; \\ \Phi_{III}, & \varphi_0 \leq |\varphi| \leq \pi, \quad r = r_4; \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{\partial\Phi_{IV}}{\partial r} = \frac{\partial\Phi_{II}}{\partial r}; \quad |\varphi| \leq \varphi_0; \quad r = r_4; \quad (12)$$

$$\frac{\partial\Phi_{IV}}{\partial r} = \frac{\partial\Phi_{III}}{\partial r}; \quad \varphi_0 \leq |\varphi| \leq \pi; \quad r = r_4; \quad (13)$$

Входящие в выражения (5)-(13) потенциалы скорости  $\Phi_I$ ,  $\Phi_{II}$ ,  $\Phi_{III}$  и  $\Phi_{IV}$  описывают звуковые поля соответственно в первой, второй, третьей и четвертой областях.

3. Электрические условия в рамках принятых допущений сводятся к заданию напряжен-

ности электрического поля в материале оболочки

$$E = E_r^{(0)} = -\frac{\psi_0}{h}. \quad (14)$$

### Вывод аналитических соотношений

Выполним решение задачи определения звукового поля излучающей уголкового рупорной антенны в «сквозной» постановке, при которой для заданной величины электрического напряжения, подводимого к антенне, можно определить и величину скорости колебаний поверхности преобразователя антенны, и величину звукового давления как в любой точке внешнего, окружающего антенну, пространства, так и во внутренней полости антенны. Изложенный подход позволяет принять во внимание способ подведения энергии к антенне, процессы преобразования подводимой электрической энергии в механическую энергию колебаний поверхностей преобразователя и механической – в акустическую энергию волн, распространяющихся в средах, физические свойства материалов, из которых выполнена конструкция антенны, и структурную схему построения антенны. В математическом плане все перечисленные особенности можно учесть, используя при решении задачи методы связанных полей, частичных областей и разделения переменных.

Построим решение сформулированной задачи следующим образом. Поведение оболочки преобразователя будем анализировать с помощью разложения искомых величин  $u$  и  $w$  в ряды по собственным формам колебаний оболочки в вакууме

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} u_n \sin(n\varphi); \quad w = \sum_{n=0}^{\infty} w_n \cos(n\varphi). \quad (15)$$

Звуковое поле антенны представим в частных областях в виде разложений по волновым цилиндрическим функциям с учетом особенностей каждой из областей.

Для первой области необходимо учесть конечность значения поля при  $r \rightarrow 0$ :

$$\Phi_I(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} E_n J_n(kr) \cos(n\varphi). \quad (16)$$

Для второй и третьей областей необходимо учесть отсутствие требования однозначности при обходе вокруг оси антенны:

$$\Phi_{II}(r, \varphi) = \sum_{q=0}^{\infty} [A_q J_{m_q}(kr) + B_q N_{m_q}(kr)] \cos[m_q \varphi]; \quad (17)$$

$$\Phi_{III}(r, \varphi) = \sum_{p=0}^{\infty} [C_p J_{m_p}(kr) + D_p N_{m_p}(kr)] \cos[m_p(\pi - \varphi)]. \quad (18)$$

Для четвертой области должно выполняться условие излучения на бесконечности:

$$\Phi_{IV}(r, \varphi) = \sum_{s=0}^{\infty} F_s H_s^{(1)}(kr) \cos(s\varphi). \quad (19)$$

В выражениях (15)-(19)  $J_m(kr)$ ,  $N_m(kr)$ ,  $H_s^{(1)}(kr)$  – функции Бесселя, Неймана и Ханкеля первого рода соответственно,  $u_n$ ,  $w_n$ ,  $E_n$ ,  $A_q$ ,  $B_q$ ,  $C_p$ ,  $D_p$  и  $F_s$  – комплексные коэффициенты.

Выражения для потенциалов скорости  $\Phi_{II}(r, \varphi)$  и  $\Phi_{III}(r, \varphi)$  удовлетворяют уравнению (4) при произвольных значениях  $m_q$  и  $m_p$ . Надлежащим выбором этих величин можно добиться частичного удовлетворения граничных условий в областях II и III соответственно. Полагая, что

$$m_q = \frac{(2q+1)\pi}{2\varphi_0}; \quad m_p = \frac{(2q+1)\pi}{2(\pi - \varphi_0)} \quad (20)$$

добиваемся удовлетворения условий (8), (9) на стенках рупора. Условие (10) позволяет установить связь между значениями коэффициентов  $D_p$  и  $C_p$ . Произведя подстановку (18) в выражение (10), получим:

$$\sum_{n=0}^{\infty} R_n w_n \cos(n\varphi) = \frac{e_{31} r_0 \psi_0}{C_{11} E} \frac{\psi_0}{h} - \frac{i\omega\alpha}{h} \left[ \rho_1 \sum_{n=0}^{\infty} E_n J_n(k_1 r_1) \cos(n\varphi) - \rho \sum_{q=0}^{\infty} [A_q J_{m_q}(kr_2) + B_q N_{m_q}(kr_2)] \cos(m_q \varphi) \right], \quad (23)$$

$$0 \leq |\varphi| \leq \pi;$$

$$\text{где } R_n = \frac{\alpha^2 \gamma^2 \omega^4 - \alpha \gamma \omega^2 (1+n^2)(1+\beta n^2) + \beta n^2 (n^2 - 1)^2}{\alpha \gamma \omega^2 - n^2 (1+\beta)}.$$

Алгебраизация функциональных уравнений (6), (7), (11)-(13) и (23), основанная на свойствах полноты и ортогональности систем функций  $\cos(n\varphi)$ ,  $\cos(m_q \varphi)$  и  $\cos[m_p(\pi - \varphi)]$  соответ-

$$w_n N_n \left[ R_n + \frac{\alpha}{h} \omega \rho_1 c_1 \frac{J_n(k_1 r_1)}{J_n'(k_1 r_1)} \right] - \frac{i\omega\alpha\rho}{h} \sum_{q=0}^{\infty} [A_q J_{m_q}(kr_2) + B_q N_{m_q}(kr_2)] N_{nq} = \frac{e_{31} r_0 \psi_0}{C_{11} E} b_n, \quad n = 0, 1, 2, \dots;$$

$$[A_q J_{m_q}'(kr_2) + B_q N_{m_q}'(kr_2)] N_q - ic \sum_{n=0}^{\infty} w_n N_{nq} = 0, \quad q = 0, 1, 2, \dots;$$

$$F_s H_s^{(1)}(kr_4) N_n - \sum_{q=0}^{\infty} [A_q J_{m_q}(kr_4) + B_q N_{m_q}(kr_4)] N_{nq} - \sum_{p=0}^{\infty} C_p \Delta_p(kr_4) N_{np} = 0, \quad s = 0, 1, 2, \dots;$$

$$D_p = \frac{C_p J_{m_p}(kr_3)}{N_{m_p}(kr_3)}$$

С учетом последнего соотношения выражение для потенциала скорости в третьей области приобретет вид:

$$\Phi_{III} = \sum_{p=0}^{\infty} C_p \Delta_p(kr) \cos[m_p(\pi - \varphi)], \quad (21)$$

$$\text{где } \Delta_p(kr) = J_{m_p}(kr) - \frac{J_{m_p}(kr_3)}{N_{m_p}(kr_3)} N_{m_p}(kr).$$

Уравнение (1) позволяет установить связь между значениями коэффициентов  $u_n$  и  $w_n$ . Подставив выражения (15) в уравнение (1), на основании свойств полноты и ортогональности системы функций  $\cos(n\varphi)$  на интервале  $[-\pi; \pi]$  получим

$$u_n = \frac{n(1+\beta n^2)}{\alpha \gamma \omega^2 - n^2(1+\beta)} w_n, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (22)$$

Подставив выражение (22) в уравнение (2) и используя соотношения (5), (19), (16) и (14), приводим это уравнение к следующему функциональному уравнению:

венно на интервалах  $[-\pi; \pi]$ ,  $[-\varphi_0; \varphi_0]$  и  $[-(\pi - \varphi_0); (\pi - \varphi_0)]$ , приводит к совокупности связанных бесконечных систем линейных алгебраических уравнений вида:

$$\left[ A_q J_{m_q}'(kr_4) + B_q N_{m_q}'(kr_4) \right] N_q - \sum_{s=0}^{\infty} F_s H_s^{(1)'}(kr_4) N_{nq} = 0, \quad q = 0, 1, 2, \dots;$$

$$C_p \Delta_p'(kr_4) N_p - \sum_{s=0}^{\infty} F_s H_s^{(1)'}(kr_4) N_{np} = 0, \quad p = 0, 1, 2, \dots$$

Здесь

$$N_n = 2 \int_0^{\pi} \cos^2(n\varphi) d\varphi; \quad N_q = 2 \int_0^{\varphi_0} \cos^2(m_q \varphi) d\varphi;$$

$$N_p = 2 \int_{\varphi_0}^{\pi} \cos^2[m_p(\pi - \varphi)] d\varphi;$$

$$N_{nq} = 2 \int_0^{\varphi_0} \cos(m_q \varphi) \cos(n\varphi) d\varphi;$$

$$N_{np} = 2 \int_{\varphi_0}^{\pi} \cos[m_p(\pi - \varphi)] \cos(n\varphi) d\varphi;$$

$$b_n = 2 \int_{\varphi_0}^{\pi} \cos(n\varphi) d\varphi$$

штрих при радиальных функциях обозначает производную по аргументу  $(kr)$  при соответствующем значении  $r, k_1$  и  $k$  – волновые числа сред внутри и вне преобразователя.

Приведенные коэффициенты могут быть определены в явном виде:

$$b_n = \begin{cases} 2\pi, & n = 0; \\ 0, & n \neq 0; \end{cases} \quad N_n = \begin{cases} 2\pi, & n = 0; \\ \pi, & n \neq 0; \end{cases}$$

$$N_q = \varphi_0; \quad N_p = \pi - \varphi_0;$$

$$N_{nq} = \begin{cases} \frac{2m_q (-1)^{q+1} \cos(n\varphi_0)}{n^2 - m_q^2}, & n \neq m_q; \\ \varphi_0, & n = m_q; \end{cases}$$

$$N_{np} = \begin{cases} \frac{2m_p (-1)^{q+1} \cos(n\varphi_0)}{n^2 - m_p^2}, & n \neq m_p; \\ (\pi - \varphi_0) \cos(m_p \pi) + (-1)^p \frac{\cos(m_p \varphi_0)}{m_p}, & n = m_p. \end{cases}$$

Приведенные соотношения позволяют определить ряд параметров, важных с точки зрения практического применения рупорной антенны. К ним прежде всего относится характеристика направленности уголкового антенны. Для её определения воспользуемся асимптотическими представлениями функций Ханкеля при больших значениях аргумента [5]. Тогда выра-

жение (19), определяющее внешнее поле антенны, примет вид:

$$\Phi_{IV}(r, \varphi) \cong \left( \frac{2}{\pi kr} \right)^{\frac{1}{2}} e^{i(kr - \frac{\pi}{4})} \sum_{s=0}^{\infty} F_s e^{-i\frac{\pi}{2}s} \cos(s\varphi)$$

С учетом его нормирования амплитудная характеристика направленности  $R(\varphi)$  будет иметь вид:

$$R(\varphi) = \frac{\left| \sum_{s=0}^{\infty} F_s e^{-i\frac{\pi}{2}s} \cos(s\varphi) \right|}{\left| \sum_{s=0}^{\infty} F_s e^{-i\frac{\pi}{2}s} \cos(s\varphi_{\max}) \right|},$$

где  $\varphi_{\max}$  – направление максимальной интенсивности излучения.

Коэффициент концентрации  $K$  на единицу высоты уголкового антенны может быть рассчитан по известной [3] формуле

$$K = \pi \left[ \int_0^{\pi} R^2(\varphi) d\varphi \right]^{-1}.$$

Сопротивление излучения уголкового антенны  $Z_s$  на единицу её высоты определим [6, 7] как

$$Z_s = \frac{2Q}{|w_{cp}|^2}, \quad \text{где } Q = \frac{1}{2} \int_s p w^* ds - \text{мощность, из-}$$

лучаемая антенной;  $w_{cp} = \frac{1}{2} \int_s w(s) ds$  – усред-

ненная по поверхности  $s$  излучения антенны колебательная скорость  $w$ ;  $p$  – давление на активной поверхности антенны; \* обозначена величина, комплексно сопряженная колебательной скорости. Учитывая, что источник звука расположен во второй частичной области, можно записать:

$$Z = -\frac{i\omega\rho r_2}{2\varphi_0} \frac{\int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} \Phi_{II} w^* d\varphi}{\int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} w d\varphi} = \rho cs [R' + iX'],$$

где  $R'$  и  $X'$  представляют собой безразмерные активную и реактивную составляющие сопротивления излучения.

## Выводы

Методами зв'язаних полей и частичних областей определено поле излучения гидроакустической антенны с акустически мягким угловым отражателем и источником звука, который является пьезокерамическим цилиндрическим преобразователем с радиальной поляризацией. Заполнение его внутренней полости упругой средой позволяет рассчитать параметры антенны в тех случаях, когда конструктивная реализация преобразователя может быть силовой или компенсированной. Решение задачи сведено к стандартной процедуре – решению бесконечной системы линейных алгебраических уравнений. Полученные соотношения позволяют выполнять проектные работы с учетом взаимодействия всех физических полей, участвующих в процессе излучения звука антенной.

## 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. Дідковський В.С., Лейко О.Г., Савін В.Г. Электроакустичні п'єзокерамічні перетворювачі (розрахунок, проектування, конструювання). – Кіровоград: «Імекс-ЛТД», 2006. – 448 с.
3. Лейко А.Г., Шамарин Ю.Е., Ткаченко В.П. Подводные акустические антенны. К.: Аванпостприм, 2000. – 320 с.
4. Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацыпура В.Т. Волновые задачи акустики. К.: Интерсервис, 2013. – 571 с.
5. Иванов Е.А. Дифракция электромагнитных волн на двух телах. – Минск: Наука и техника, 1968. – 584 с.
6. Смаришев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973. – 278 с.
7. Коржик А.В. Особенности импедансных характеристик цилиндрического излучателя нулевого порядка, размещенного в замкнутом кольцевом слое // Электроника и связь. – 2013, №3. – с. 49-55.

Поступила в редакцию 14 марта 2014 г.

УДК 534.232

**З.Т. Гусак, О.Г. Лейко**, д-р.тех.наук

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

## Поле випромінювання кутикової рупорної антени з п'єзокерамічним перетворювачем з радіальною поляризацією

*Розглянута гідроакустична антена, відбивач якої виконаний у вигляді акустично м'якого кутикового рупора, а джерелом звуку є п'єзокерамічний циліндричний перетворювач з радіальною поляризацією. Внутрішня порожнина перетворювача заповнена пружним середовищем, що характерно для перетворювачів і силової, і компенсованої конструкцій. Задача випромінювання звуку такою антеною в «наскрізній» постановці вирішена з використанням методів зв'язаних полів і часткових областей. Всі фізичні поля антени представлені у вигляді розкладів в ряди Фур'є, коефіцієнти яких визначаються в результаті розв'язку диференціальних рівнянь, що описують електропружні коливання п'єзокерамічного перетворювача і хвильові процеси в акустичних середовищах, що контактують з ним. Задача зведена до розв'язку нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів розкладу. Бібл. 7, рис. 1.*

**Ключові слова:** фізичні поля, кутикова рупорна антена, п'єзокерамічний перетворювач, радіальна поляризація.

---

UDC 534.232

**Z.T. Gusak, A.G. Leyko**, Dr.Sc.

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

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

*Hydroacoustic antenna in which reflector is designed as an acoustically soft angled horn and the sound source is cylindrical piezoceramic transducer with radial polarization, is considered. The internal cavity of transducer is filled with an elastic medium, which is typical for transducers both power and compensated designs. Problem of sound radiation of such an antenna in "through" setting solved using methods related fields and partial areas. All physical fields of antenna are presented in the form of expansions in Fourier series whose coefficients are determined by the joint solution of differential equations describing the electro-elastic vibrations of a piezoceramic transducer and wave processes in acoustic mediums, that is in contact with him. The problem is reduced to the solution of an infinite system of linear algebraic equations relative to the coefficients of expansions. Reference 7, figures 1.*

**Keywords:** *physical fields, horn hydroacoustic antenna, piezoelectric transducer, radial polarization, power and compensated design.*

### **References**

1. *Didkovskiy V. S., Poroshyn S. M., Leyko O. G., Leyko A. O., Drozdenko O.I.* (2013) "Construction of electroacoustic instruments and systems for multimedia acoustic technology". Kharkov. P. 390. (Ukr)
2. *Didkovskiy V. S., Leyko O. G., Savin V.G.* (2006) "Electroacoustic piezoceramic transducers (calculation, design, construction)". Kirovograd. Imex-LTD. P. 448. (Ukr)
3. *Leyko O. G., Shamarin U. E., Tkachenko V. P.* (2000) "Underwater acoustic antennas". Kiyv. Avanpostprim. P. 320. (Ukr)
4. *Grinchenko V.T., Vovk I.V., Matsipura V.T.* (2013) "Wave of hydroacoustic". Kiyv. Interservis. P 571. (Rus)
5. *Ivanov E. A.* (1968) "Diffraction of electromagnetic waves on two bodies". Minsk. Nauka i tekhnika. P. 584. (Rus)
6. *Smaryshev M. D.* (1973) "Directivity of hydroacoustic antennas". Leningrad. Sudostroenie. P. 278 (Rus)
7. *Korzhyk A. V.* (2013) "Features impedance characteristics of a cylindrical transducer zero order, placed in a closed circular layer". Elektronika i svyaz'. Vol. 3, pp. 49-55. (Rus)