

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.

Физические поля гидроакустической антенны, состоящей из углового рупора и пьезокерамического излучателя с окружной поляризацией

Рассмотрена гидроакустическая антенна, состоящая из углового рупорного отражателя мягкого типа и расположенного в его устье цилиндрического пьезокерамического излучателя с окружной поляризацией. При этом конструктивное исполнение излучателя может иметь силовой или компенсированный варианты.

Методами связанных полей и частичных областей решена задача и получены аналитические выражения, описывающие физические поля рупорной антенны – акустические, механические и электрические. Эти поля представлены в виде разложений в ряды по волновым функциям круговой цилиндрической системы координат с неизвестными коэффициентами разложений, определяемыми из граничных условий и условий сопряжения полей на границах раздела областей. Решение сведено к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений. Библ. 4, рис. 2.

Ключевые слова: физические поля, рупорная гидроакустическая антенна, цилиндрический пьезокерамический преобразователь, окружная поляризация, силовая и компенсированная конструкция.

Введение

Среди большого разнообразия типов гидроакустических антенн широкое применение получили антенны, в состав которых входят различные отражающие устройства. К ним относятся, в частности, рупорные гидроакустические антенны, которые могут использоваться как для самостоятельной работы, так и служить элементами более сложных гидроакустических антенн. Рупорные антенны обладают рядом достоинств, к основным из которых следует отнести простоту и гибкость возможного управления формой характеристики направленности и её изменениями, диапазонные свойства антенн, а также относительно простую конструктивную реализацию антенн.

Среди рупорных гидроакустических антенн одной из наиболее распространенных является угловая антенна. Она состоит (рис. 1) из углового рупора 2 и размещенного в его горле источника звуковых волн 1. В качестве источника звука чаще всего используются цилиндрические пьезокерамические преобразователи, тыльная часть поверхности которых покрывается акустическим экраном 3.

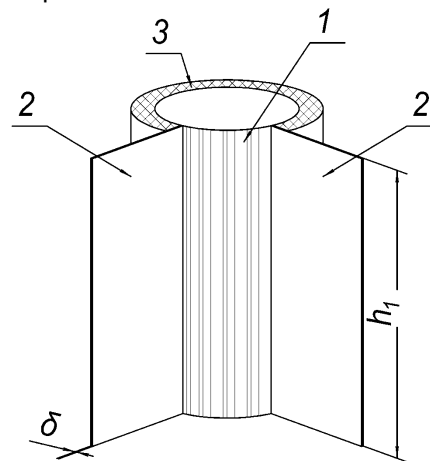


Рис. 1. Изображение угловой рупорной антенны

Пьезокерамические преобразователи могут быть выполнены с использованием окружной или поперечной поляризации в виде конструкций силового или компенсированного типов [1]. Акустические экраны могут быть мягкими, жесткими или иметь конечную звукопрозрачность [2, 3]. Естественно, что при таком разнообразии физических материалов и конструкций, возможных к применению при технической реализации рупорных гидроакустических антенн, методики анализа звуковых полей, создаваемых такого типа гидроакустическими антеннами, развиты в недостаточной степени и не позволяют эффективно определять количественные характеристики этих полей. Прежде всего это касается антенн, размеры которых сравнимы с длиной излучаемой ими волны. Следует отметить, что имеется ряд работ, не опубликованных в открытой литературе, где изучались некоторые ас-

пекты построения рупорных гидроакустических антенн. Однако их основным недостатком с точки зрения сегодняшнего состояния развития гидроакустики является отсутствие учета в исследованиях процессов взаимодействия физических полей, имеющих место в пьезокерамических преобразователях при преобразовании электрической энергии в звуковую, и их влияния на физические поля, формируемые рупорными гидроакустическими антеннами.

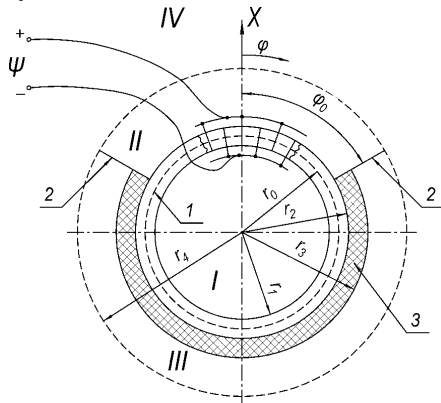


Рис. 2. Изображение нормального сечения уголкового антенны

Целью данной работы и ряда последующих работ является восполнение существующих пробелов в изучении таких антенн. Это позволит, во-первых, выяснить потенциальные возможности рупорных гидроакустических антенн, и, во-вторых, получить исходные данные для рационального их проектирования, улучшив тем самым качество проектных работ.

Расчетная модель уголкового антенны

Определим физические поля уголкового рупорной антенны (рис. 1), источником звука в которой является круговой цилиндрический пьезокерамический излучатель с окружной поляризацией силовой или компенсированной конструкции. При этом внутренняя полость пьезокерамической оболочки излучателя с плотностью

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

$$\frac{\partial u}{\partial \varphi} + \beta \left(\frac{\partial^3 u}{\partial \varphi^3} - \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} \right) - w - \frac{e_{33}}{C_{33}} r_0 \frac{n}{2\pi r_0} \frac{\psi_0}{h} + \frac{\alpha}{h} q_r = \alpha \gamma \frac{\partial^2 w}{\partial t^2};$$

- уравнений вынужденной электростатики для пьезокерамики

$$\vec{E} = -\text{grad}\psi; \text{div}\vec{D} = 0. \tag{3}$$

ρ_1 , скоростью звука c_1 и толщиной h может быть вакуумирована, заполнена газом или жидкостью. Окружная поляризация реализуется путем построения оболочки из жестко склеенных между собой n пьезокерамических призм, электрически включенных параллельно. К электродам призм подводится гармонически изменяющееся во времени t электрическое напряжение $\psi = \psi_0 e^{-i\omega t}$ частотой ω . Уголкового рупорной высотой h_1 и толщиной стенок δ , а также тыльный экран излучателя выполнены из акустически мягкого материала, например, звукоотражающей резины марки 51-1415. Антенна располагается в среде с плотностью ρ и скоростью звука c .

При выборе расчетной модели введем ряд допущений. Будем полагать, что высота h_1 антенны является бесконечно большой, распределение колебательной скорости по высоте антенны однородно, акустически мягкий материал идеален, а толщина стенок δ бесконечно мала. В техническом плане такая идеализация физически обоснована [3]. Введем в рассмотрение (рис. 2) декартову систему координат $OXYZ$, ось OZ которой направлена вдоль продольной оси цилиндрической оболочки, а ось OX – вдоль бисектрисы угла $2\varphi_0$ раскрыва рупора, и связанную с ней круговую цилиндрическую систему (r, φ, Z) .

С учетом принятых допущений поле излучения Φ рассматриваемой рупорной антенны может быть определено через совместное решение:

- уравнения Гельмгольца, описывающего движение упругих сред (газа или жидкости) внутри и вне излучателя

$$\Delta \Phi + k_i^2 \Phi = 0; \tag{1}$$

- уравнений движения [4] тонких оболочек с окружной поляризацией в перемещениях

Здесь: Δ – оператор Лапласа; Φ – потенциал скорости; k_i – волновые числа внешней и внутренней сред; u, w – окружная и нормальная составляющие вектора смещений точек сре

динной поверхности оболочки;

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

нагрузка; $C_{33}^E, \epsilon_{33}^S, e_{33}$ – соответственно модуль упругости при нулевой электрической напряженности, диэлектрическая проницаемость при нулевой деформации, пьезоконстанта; γ – плотность материала пьезокерамической оболочки излучателя; \vec{E} и \vec{D} – векторы напряженности и индукции электрического поля.

Граничные условия задачи формулируются в виде:

на внутренних стенках рупора

$$\Phi = 0; \quad |\varphi| = \varphi_0; \quad r_2 \leq r \leq r_4; \quad (4)$$

– на внешних стенках рупора

$$\Phi = 0; \quad |\varphi| = \varphi_0; \quad r_3 \leq r \leq r_4; \quad (5)$$

– на тыльном экране излучателя

$$\Phi = 0; \quad \varphi_0 \leq \varphi \leq \pi; \quad r = r_3; \quad (6)$$

– электрические условия сводятся к заданию напряженности электрического поля в материале оболочки

$$E_\varphi = -\frac{\psi_0 n}{2\pi r_0} \quad (7)$$

Эти условия дополняются условиями излучения на бесконечности [2].

Таким образом с учетом принятых допущений задача определения физических полей рупорной антенны сводится к решению плоской краевой задачи.

Вывод расчетных соотношений

Решения сформулированной задачи будем строить следующим образом. Поведение оболочки излучателя анализируем с помощью разложения искомых величин u и w в ряды по собственным формам колебаний оболочки в вакууме

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} u_n \sin(n\varphi); \quad w = \sum_{n=0}^{\infty} w_n \cos(n\varphi) \quad (8)$$

Решение уравнения Гельмгольца (1) будем осуществлять методом частичных областей.

Для этого разобьем всю область существования звукового поля на четыре частичные области:

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

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

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

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

Тогда полная система исходных соотношений задачи включает в себя следующие условия сопряжения звуковых полей на границах раздела областей:

– на поверхности оболочки выполняются условия равенства скоростей колебаний частиц сред и скоростей нормальных смещений поверхности оболочки:

$$v = -\frac{\partial \Phi_I}{\partial r} = -\frac{\partial w}{\partial t}; \quad 0 \leq |\varphi| \leq \pi; \quad r = r_1; \quad (9)$$

$$v = -\frac{\partial \Phi_{II}}{\partial r} = -\frac{\partial w}{\partial t}; \quad 0 \leq |\varphi| \leq \varphi_0; \quad r = r_2; \quad (10)$$

– на поверхности оболочки преобразователя выполняется условие равенства нормальных напряжений:

$$\sigma_r = q_r = -(P_{II} - P_I), \quad 0 \leq |\varphi| \leq \pi; \quad r = r_2, \quad (11)$$

здесь $P_{II} = \rho \frac{\partial \Phi_{II}}{\partial t}; \quad P_I = \rho_1 \frac{\partial \Phi_I}{\partial t}$ – радиационные нагрузки от динамического давления.

$$\Phi_{IV} = \begin{cases} \Phi_{II}, & |\varphi| \leq \varphi_0, \quad r = r_4; \\ \Phi_{III}, & \varphi_0 \leq \varphi \leq \pi, \quad r = r_4; \end{cases} \quad (12)$$

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

$$\frac{\partial \Phi_{IV}}{\partial r} = \frac{\partial \Phi_{III}}{\partial r}; \quad \varphi_0 \leq \varphi \leq \pi, \quad r = r_4; \quad (14)$$

Потенциал скорости, создаваемый рупорной антенной, можно представить через потенциалы скорости в каждой из указанных частичных областей.

Для области I, не имеющей особенностей во внутренней полости излучателя:

$$\Phi_I = \sum_n E_n J_n(kr) \cos(n\varphi); \quad (15)$$

Для областей II и III имеем:

$$\Phi_{II} = \sum_q \left[A_q J_{m_q}(kr) + B_q N_{m_q}(kr) \right] \cos(m_q \varphi); \quad (16)$$

$$\Phi_{III} = \sum_p^{\infty} [C_p J_{m_p}(kr) + D_p N_{m_p}(kr)] \cos[m_p(\pi - \varphi)]; \quad (17)$$

поле в области IV должно удовлетворять условию излучения на бесконечности:

$$\Phi_{IV} = \sum_s^{\infty} F_s H_s^{(1)}(kr) \cos(s\varphi); \quad (18)$$

здесь $n = 0, 1, 2, \dots$; $q = 0, 1, 2, \dots$; $p = 0, 1, 2, \dots$; $s = 0, 1, 2, \dots$; $J_n(kr)$; $N_n(kr)$; $H_s(kr)$ – функции Бесселя, Неймана и Ханкеля первого рода соответственно; E_n ; A_q ; B_q ; C_p ; D_p ; F_s – комплексные коэффициенты.

Выражения для потенциалов скорости Φ_{II} и Φ_{III} в соответствующих областях удовлетворяют уравнению Гельмгольца (1) при произвольных m_q и m_p . Надлежащим выбором этих величин можно добиться удовлетворения граничных условий в областях II и III соответственно. Для этого необходимо подставить выражения (16) и (17) в граничные условия (4) и (5). Выполнив необходимые преобразования, получим:

$$m_q = \frac{(2q+1)\pi}{2\varphi_0}; \quad m_p = \frac{(2p+1)\pi}{2(\pi - \varphi_0)}. \quad (19)$$

Условие (6) позволяет установить связь между значениями коэффициентов C_p и D_p . Проведя подстановку выражения (17) в условие (6), получим:

$$\sum_{n=0}^{\infty} R_n w_n \cos(n\varphi) = -\frac{e_{33} r_0}{C_{33}^E} \frac{n \psi_0}{2\pi r_0} - \frac{i\omega\alpha}{h} [\rho_1 \sum_n E_n J_n(k_1 r_1) \cos(n\varphi) - \rho_2 \sum_q [A_q J_{m_q}(kr_2) + B_q N_{m_q}(kr_2)] \cos(m_q \varphi)], \quad 0 \leq |\varphi| \leq \pi. \quad (23)$$

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 (23), (9), (10), (12)-(14), основанная на свойствах полноты и ортогональности функций $\cos(n\varphi)$, $\cos(m_q \varphi)$ и $\cos[m_p(\pi - \varphi)]$

$$D_p = \frac{C_p J_{m_p}(kr_3)}{N_{m_p}(kr_3)}; \quad (20)$$

С учетом соотношения (20) выражение (17) приобретает вид:

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

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

Коэффициенты u_n и w_n разложений в соотношениях (8) должны определяться на основе удовлетворения уравнений (2) и условий сопряжения (9)-(11). Из первого уравнения системы (2) вытекает следующая связь между искомыми коэффициентами:

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

Используя (22) во втором уравнении системы (2), приводим последнее к функциональному уравнению следующего вида:

на интервалах $[-\pi; \pi]$, $[-\varphi_0; \varphi_0]$ и $[-(\pi - \varphi_0); (\pi - \varphi_0)]$ соответственно и выполнение ряда преобразований приводят к следующей бесконечной системе линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases}
 w_n N_n \left[R_n - \frac{\alpha}{h} \omega \rho_1 c_1 \frac{J_n(k_1 r_1)}{J_n(k_1 r_1)} \right] - \frac{i \omega \alpha \rho}{h} \sum_{q=0}^{\infty} \left[A_q J_{m_q}(k r_2) + B_q N_{m_q}(k r_2) \right] N_{nq} = \\
 = \frac{e_{33}}{C_{33}^E} \frac{n \psi_0}{2\pi} b_n, \quad n = 0, 1, 2, \dots; \\
 \left[A_q J_{m_q}'(k r_2) + B_q N_{m_q}'(k r_2) \right] N_q - i c \sum_{n=0}^{\infty} w_n N_{nq} = 0, \quad q = 0, 1, 2, \dots; \\
 F_s H_s^{(1)}(k r_4) N_{nq} - \sum_{q=0}^{\infty} \left[A_q J_{m_q}(k r_4) + B_q N_{m_q}(k r_4) \right] N_q - \\
 - \sum_{p=0}^{\infty} C_p \Delta_p(k r_4) N_{np} = 0, \quad s = 0, 1, 2, \dots; \\
 \left[A_q J_{m_q}'(k r_4) + B_q N_{m_q}'(k r_4) \right] N_q - \sum_{s=0}^{\infty} F_s H_s^{(1)'}(k r_4) N_{nq} = 0, \quad q = 0, 1, 2, \dots; \\
 C_p \Delta_p'(k r_4) N_p - \sum_{s=0}^{\infty} F_s H_s^{(1)'}(k r_4) N_{np} = 0, \quad p = 0, 1, 2, \dots
 \end{cases} \quad (24)$$

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

$$N_p = 2 \int_{\varphi_0}^{\pi} \cos^2[m_p(\pi - \varphi)] d\varphi; \quad N_{nq} = 2 \int_0^{\varphi_0} \cos(m_q \varphi) \cos(n\varphi) d\varphi; \quad (25)$$

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

штрих означает производную функции, k_1 и k – волновые числа сред внутри и вне излучателя.

Коэффициенты (25) системы (24) могут быть вычислены в явном виде:

$$N_n = \begin{cases} 2\pi, & n = 0; \\ \pi, & n \neq 0; \end{cases} \quad N_q = \varphi_0; \quad N_p = \pi - \varphi_0;$$

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

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

Выводы

Таким образом, была получена бесконечная система уравнений, описывающих все физические поля, которые присутствуют в рупорной антенне, излучателем которой является цилиндрический преобразователь с окружной поляризацией.

Методом связанных полей в «сквозной» постановке решена задача излучения звука угловой рупорной антенной. Её излучателем является цилиндрический пьезокерамический преобразователь с окружной поляризацией, ко-

торый технически может быть реализован в виде силовой или компенсированной конструкций. Решение сведено к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений. На основе полученных соотношений в дальнейшем будут рассчитаны параметры всех физических полей – акустических, механических и электрических, взаимодействующих между собой в процессе работы антенны, и установлены закономерности их изменений в зависимости от вида конструктивного исполнения антенны.

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. Гринченко В.Т., Вовк И.В., Мацьпура В.Т. Волновые задачи акустики. К.: Интерсервис, 2013. – 571 с.
3. Лейко А.Г., Шамарин Ю.Е., Ткаченко В.П. Подводные акустические антенны. К.: Аванпостприм, 2000. – 320 с.
4. Савин В.Г., Дидусенко Ю.А. Уравнения движения тонкостенных цилиндрических пьезокерамических преобразователей с окружной поляризацией // КОНСОНАНС-2011. Акустический симпозиум. – 2011. – с. 230-235.

Поступила в редакцию 30 декабря 2013 г.

УДК 534.232

З.Т. Гусак, А.Г. Лейко, д-р тех. наук

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

Фізичні поля гідроакустичної антени, що складається з кутового рупора і п'єзокерамічного перетворювача з обводною поляризацією

Розглянута гідроакустична антена, що складається з кругового рупорного відбивача м'якого типу і розташованого в його гирлі циліндричного п'єзокерамічного випромінювача з обводною поляризацією. При цьому конструктивне виконання випромінювача може мати силовий або компенсований варіанти.

Методами зв'язаних полів і часткових областей вирішена задача і отримані аналітичні вирази, що писують фізичні поля рупорної антени – акустичні, механічні і електричні. Ці поля представлені у вигляді розкладень у ряди по хвильовим функціям кругової циліндричної системи координат з невідомими коефіцієнтами розкладів, що визначаються із граничних умов і умов спряження полів на межах розділу областей. Рішення зведено до нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Бібл. 4, рис. 2.

Ключевые слова: фізичні поля, рупорна гідроакустична антена, циліндричний п'єзокерамічний перетворювач, обводова поляризація, силова і компенсована конструкція.

UDC 534.232

Z.T. Gusak, A.G. Leiko, Dr.Sc.,

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

Physical fields of hydroacoustic antenna consisting of the angle of the horn and the piezoceramic transducer with a circumferential polarization

Considered hydroacoustic antenna consisting of the angle of the horn reflector soft type and placed in his mouth cylindrical piezoceramic transducer with a circumferential polarization. Thus the design of the transmitter can be power or compensating type.

The problem was solved by methods related fields and analytical expressions describing the physical fields of the horn antenna – acoustic, mechanical and electrical. These fields are presented in the form of expansions in series of the wave functions of the circular cylindrical coordinate system with unknown expansion coefficients which are determined from the boundary conditions and the matching conditions at the interfaces between fields areas. Solution is reduced to an infinite system of linear algebraic equations. References. 4, Fig. 2.

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

References

1. *Didkovskij V. S., Poroshin S. M., Lejko O. G., Lejko A. O., Drozdenko O.I. (2013) "Construction of electroacoustic instruments and systems for multimedia acoustic technology". Kharkov. P. 390. (Ukr)*
2. *Grinchenko V.T., Vovk I.V., Macypura V.T. (2013) "Wave of hydroacoustic". Kiyv. Interservis. P 571. (Ukr)*
3. *Lejko O. G., Shamarin U. E., Tkachenko V. P. (2000) "Underwater acoustic antennas" Kiyv. Avanpostprim. P. 320. (Ukr)*
4. *Savin V.G., Didusenko Y.A. (2011), "The equations of motion of thin-walled cylindrical piezoelectric transducers with a circumferential polarization". Consonance-2011, Acoustic Symposium. pp. 230-235. (Rus)*