

Акустичні прилади та системи

УДК 534.232; 534.231

DOI: [10.20535/2523-4455.2018.23.2.121316](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.2.121316)

Излучение максимальной акустической мощности системами гидроакустических цилиндрических пьезокерамических преобразователей с окружной поляризацией

Дрозденко А. И., к. т. н. доц., ORCID [0000-0001-6647-1428](https://orcid.org/0000-0001-6647-1428)e-mail oi.drozdenco@aae.kpi.uaЛейко А. Г., д. т. н. проф. ORCID [0000-0002-5588-6449](https://orcid.org/0000-0002-5588-6449)e-mail og.leiko@aae.kpi.uaКафедра акустики и акустоэлектроники acoustic.kpi.ua

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua

Киев, Украина

Реферат—Для произвольных систем гидроакустических излучателей проанализированы те физические факторы, которые ограничивают возможности излучения максимальной акустической мощности такими системами. К ним отнесены механическая, электрическая и тепловая прочности излучателей систем. Для механической прочности пьезокерамических излучателей определены возможные физические причины, ограничивающие ее величину, и на основе их анализа предложен ряд возможных подходов, техническая реализация которых позволяет повысить акустическую мощность, излучаемую системой. Для одного из этих подходов, связанного с организацией в системе одинаковой колебательной скорости излучателей, близкой к предельно возможной для их механического разрушения, сформулирована и методом связанных полей в многосвязных областях решена задача излучения произвольной системой, образованной из конечного числа гидроакустических цилиндрических пьезокерамических излучателей с окружной поляризацией, максимальной акустической мощности.

Библ. 8, рис. 1.

Ключевые слова — система излучателей; цилиндрический пьезокерамический излучатель; механическая прочность.

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1], любое гидроакустическое устройство проектируется для работы с определенными энергетическими возможностями в течении временного интервала в установленных условиях эксплуатации. Вместе с тем существует ряд физических факторов, которые ограничивают эти возможности. Эти факторы можно разделить на внутренние и внешние. В частности, для системы гидроакустических излучателей при излучении звука внутренними ограничивающими физическими факторами являются динамическая механическая прочность, электрическая прочность и тепловая прочность. К внешним факторам следует отнести кавитационную прочность среды, в которой эксплуатируется система. Анализ накопленного опыта свидетельствует о том, что при построении гидроакустической системы из пьезокерамических преобразователей наиболее слабым прочностным элементом их конструкций в режиме

излучения являются активные элементы преобразователей [1,2]. При этом среди названных физических факторов, ограничивающих энергетические возможности гидроакустических систем, на первое место следует поставить механическую прочность. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, в процессе эксплуатации гидроакустические системы подвергаются действию как статических, так и динамических механических воздействий. Способность пьезокерамических преобразователей оказывать сопротивление разрушению через разрыв их активного материала при воздействии механических усилий оценивается в количественном отношении пределом прочности $\sigma_{гр}$. Предел прочности представляет собой те максимальные статические и динамические механические напряжения растягивания $\sigma_{гр}$, которые данный конструкционный материал выдерживает. Особенность пьезокерамических материалов в связи со спецификой их микроструктуры состоит



в том, что их механическая прочность на сжатие $\sigma_{сж} = (35 \div 50) \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2$, на порядок выше прочности на растяжения $\sigma_{раст} = (1,7 \div 3) \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2$.

Во-вторых, для обеспечения механической прочности конструкций гидроакустических систем необходимо, чтобы во всех случаях рабочие механические напряжения σ_{Σ} , которые создаются всеми видами эксплуатационных воздействий, не превышали разрушающих значений $\sigma_{гр}$. В общем виде суммарные механические напряжения в конструкциях гидроакустических преобразователей определяются выражением [1]:

$$\sigma_{\Sigma} = a_1 \sigma_{гст} + a_2 \sigma_N + a_3 \sigma_{арм} + a_4 \sigma_T + a_5 \sigma_{ск} + a_6 \sigma_{уд},$$

где a_1, a_2, \dots, a_6 – коэффициенты приведения соответствующих напряжений к статическим; $\sigma_{гст}$ – механические напряжения, которые возникают под действием гидроакустического давления; σ_N – механические циклические напряжения, возникающие при колебаниях активного элемента преобразователей на одной из собственных форм при излучении акустической мощности; $\sigma_{арм}$ – напряжения, создаваемые в активном элементе при его упрочнении путем армирования; σ_T – температурные напряжения, обусловленные изменением температуры преобразователей антенны; $\sigma_{ск}$ – напряжения, возникающие в конструкции преобразователя при его сборке; $\sigma_{уд}$ – механические напряжения, создаваемые в преобразователе при импульсных воздействиях.

В-третьих, из приведенных выше механических напряжений только механические динамические напряжения создаются в элементах гидроакустических систем при их работе в режиме излучения звуковой энергии. Их величина дает представление о напряженном состоянии активных пьезокерамических элементов конструкций излучателей и в значительной мере определяется характеристиками режима излучения. Очевидно, что чем больше величина удельной излучаемой системой акустической мощности, тем большие динамические механические напряжения создаются в активных элементах ее излучателей. В частности, для цилиндрических пьезокерамических излучателей, работающих на продольных колебаниях вдоль окружности, их удельная излучаемая мощность определяется выражением [1]:

$$W_{уд} = \frac{1}{2} \alpha (\rho c)_в v_m^2,$$

где α – безразмерный коэффициент активной составляющей сопротивления излучения преобразователя системы; $(\rho c)_в$ – удельное волновое сопротивление воды; v_m – максимальная амплитуда колебательной скорости излучателя в системе. При этом связь между амплитудами механического динамического напряжения σ_N в материале излучателя и радиальной колебательной скорости его поверхности определяется соотношением:

$$v_m = \frac{\sigma_N}{(\rho c)_к},$$

где $(\rho c)_к$ – удельное волновое сопротивление активного материала (пьезокерамики) излучателей в системе. Из приведенного следует, что максимальные значения колебательных скоростей излучателей являются определяющими при оценке механической прочности пьезокерамических излучателей гидроакустической системы, поскольку всегда существует предельно допустимая колебательная скорость, выше которой наступает механическое разрушение излучателей в гидроакустической системе.

В-четвертых, существенную роль в обеспечении заданного уровня механической прочности излучателей системы и, в связи с этим, влияние на ее энергетическую эффективность, приобретает характер электрического возбуждения ее излучателей. Как уже отмечалось выше, ограничивающими энергетическую эффективность гидроакустической системы, являются механическая, электрическая и тепловая прочности их конструктивных элементов. Особую важность при этом приобретает совместное рассмотрение механических и электрических ограничивающих факторов, поскольку только на этом пути возможно определение путей повышения энергетической эффективности гидроакустической системы. При этом из физических соображений ясно, что в принципе есть три возможных подхода.

Первый подход, который в настоящее время получил наибольшее распространение в связи с простотой своей технической реализации электронной части гидроакустических устройств, состоит в возбуждении всех излучателей гидроакустической системы одинаковым электрическим напряжением, что позволяет избежать проблем с электрической прочностью системы. Однако, как показали последние исследования [3 – 7], при таком подходе, из-за наличия взаимодействия излучателей в системах по акустическому полю, в связи с работой их в области основного механического резонанса излучателей, и сравнимостью размеров излучателей с длиной волны на рабочей частоте возникают существенные проблемы с механической прочностью пьезокерамических излучателей. Они обусловлены появлением значительного различия в амплитудах колебательных скоростей излучателей в системе. Эти отличия не позволяют полностью реализовать потенциальные возможности системы по излучаемой мощности, поскольку отдельные их излучатели приобретают из-за акустического взаимодействия колебательную скорость, предельно допустимую или большую с точки зрения их механического разрушения.

Второй подход связан с обеспечением такого электрического возбуждения элементов системы, при котором все её излучатели будут иметь одинаковую колебательную скорость. Этот подход обеспечивает заданную механическую прочность излучателей системы, однако его техническая реализация сопряжена с необходимостью возбуждения излучателей либо от электронных генераторов с бесконечной электрической мощностью [6], что нереально, либо



от генераторов, формирующих специальные амплитудно-фазовые распределения для каждого излучателя системы. В обоих случаях на первый план выходит проблема, обеспечения электрической прочности элементов конструкций системы.

Возможен и третий подход, при котором осуществляется поиск таких электрических возбуждений излучателей системы, при котором обеспечиваются приемлемые уровни и механической, и электрической прочностей элементов ее конструкций.

Целью данной статьи является решение задачи излучения звука произвольной системой, образованной из конечного числа круговых цилиндрических пьезокерамических преобразователей, при условии обеспечения их максимальной механической динамической прочности. Как уже отмечалось, такой подход позволяет создавать гидроакустические системы с максимальными уровнями излучаемой акустической мощности.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу об излучении звука произвольной гидроакустической системой, образованной из конечного числа N круговых цилиндрических пьезокерамических излучателей с окружной поляризацией. Продольные оси излучателей параллельны между собой и произвольным образом расположены в пространстве. Каждый излучатель представляет собой круговую цилиндрическую оболочку со средним радиусом r_{0s} и толщиной h_s , образованную из $M^{(s)}$ пьезокерамических элементов-призм, жестко склеенных между собой в единую конструкцию. Внутренняя полость излучателей может быть вакуумирована, заполнена воздухом или жидкостью. Каждый излучатель системы возбуждается на нулевой моде колебаний электрическим напряжением $\Psi^{(s)} = \Psi_0^{(s)} e^{-i\omega t}$, где ω – круговая частота возбуждения излучателей. Напряжения возбуждения $\Psi_0^{(s)}$ выбраны таким образом, что все излучатели в решетке колеблются с одинаковой скоростью $\dot{W}^{(s)}$ и эта скорость равна предельно допустимой колебательной скорости

$\dot{W}^{(s)} = \dot{W}_{0, \max}^{(s)}$, выше которой наступает механическое разрушение излучателей. Именно при таком подходе, как было показано выше, обеспечивается максимальная энергетическая эффективность рассматриваемой системы. Таким образом, в изложенной постановке задача об излучении звука системой сводится к определению электрических напряжений возбуждения ее излучателей.

$$\begin{aligned} (1 + \beta^{(s)}) \frac{\partial^2 U^{(s)}}{\partial \varphi_s^2} + \frac{\partial W^{(s)}}{\partial \varphi_s} - \beta^{(s)} \frac{\partial^3 W^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} &= \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 U^{(s)}}{\partial t^2}; \\ -\frac{\partial U^{(s)}}{\partial \varphi_s} + \beta^{(s)} \left(\frac{\partial^3 W^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} - \frac{\partial^4 W^{(s)}}{\partial \varphi_s^4} \right) - W^{(s)} + \frac{e_{33}^{(s)} r_{0s}}{C_{33}^{E(s)}} E_\varphi^{(0)s} + \frac{\alpha^{(s)}}{h_s} q_r^{(s)} &= \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 W^{(s)}}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

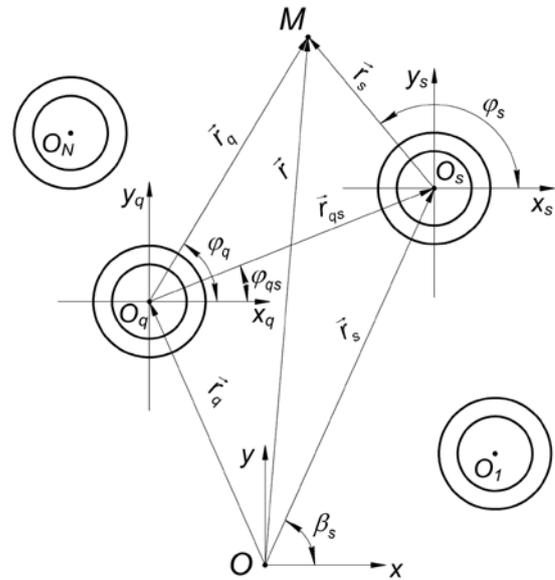


Рис.1. Система излучателей и введенные прямоугольные и цилиндрические системы координат.

Для решения задачи введем ряд допущений и систем координат. Будем полагать, что излучатели являются бесконечно длинными. Это утверждение справедливо, если высота излучателей превышает (3-5) длин рабочих волн [6]. Внутренние полости излучателей заполнены упругими средами с плотностью ρ_s и скоростью звука c_s , $s = 1, \dots, N$. Система излучателей располагается в идеальной сжимаемой среде с волновым сопротивлением ρc . Нормальное сечение схемы построения системы и введенные для решения задачи прямоугольные и связанные с ними круговые цилиндрические системы координат изображены на рис.1.

В математическом плане решение рассматриваемой задачи сводится к совместному решению системы дифференциальных уравнений:

- уравнения Гельмгольца, описывающего движение упругих сред внутри и вне каждого s -го излучателя системы:

$$\Delta \Phi^{(s)} + k_s^2 \Phi^{(s)} = 0; \quad (1)$$

- уравнения движения тонкой пьезокерамической оболочки с окружной поляризацией s -го излучателя системы в перемещениях [7]:

- уравнения вынужденной электростатики для пьезокерамики s -го излучателя:

$$\vec{E}^{(s)} = -\text{grad } \Psi^{(s)}; \text{div } \vec{D}^{(s)} = 0. \quad (3)$$

Здесь Δ – оператор Лапласа; $\Phi^{(s)}$ – потенциал колебательной скорости s -го излучателя; k и k_s – волновые числа внешней и внутренней сред s -го излучателя; $U^{(s)}$ и $W^{(s)}$ – окружная и нормальная составляющие вектора смещений точек срединной поверхности s -го излучателя;

$$\beta^{(s)} = \frac{h_s^2}{12r_{0s}^2} \left(1 + \frac{e_{33}^{2(s)}}{C_{33}^{E(s)} \epsilon_{33}^{s(s)}} \right); \alpha^{(s)} = \frac{r_{0s}^2}{C_{33}^{E(s)}};$$

$\gamma^{(s)}$ – плотность материала s -й оболочки; $q_r^{(s)}$ – внешняя радиационная нагрузка s -го излучателя; $C_{33}^{E(s)}$, $\epsilon_{33}^{s(s)}$, $e_{33}^{(s)}$ – модули упругости при нулевой электрической напряженности, диэлектрическая проницаемость при нулевой деформации и пьезоконстанта s -го излучателя соответственно; $\vec{E}^{(s)}$ и $\vec{D}^{(s)}$ – векторы напряженности и индукции электрического поля s -го излучателя.

С учетом условия задачи $W^{(s)} = \dot{W}_{0,\max}$ для всех $s = 1, \dots, N$ выражение (2), описывающее радиальные колебания пьезокерамических оболочек, приобретает вид:

$$\frac{e_{33}^{(s)}}{C_{33}^{E(s)}} r_{0s} E_\phi^{(0)s} + \frac{\alpha^{(s)}}{h_s} q_r^{(s)} = \dot{W}_{0,\max} \left(1 - \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \omega^2 \right), \quad (4)$$

где $W^{(s)} = \frac{dW^{(s)}}{dt}$, и $\frac{\partial^2 W^{(s)}}{\partial t^2} = -\omega^2 W^{(s)}$.

С учетом того, что акустическое поле формируется каждым излучателем системы в двух областях – внутренней $\Phi_2^{(s)}$ и внешней $\Phi_1^{(s)}$ с границами $0 \leq |\phi_s| \leq \pi$; $0 \leq r_{2s} = r_{0s} - h_s/2$ и $0 \leq |\phi_s| \leq \pi$; $r_s \geq r_{1s} = r_{0s} + h_s/2$ соответственно, кинематические и динамические условия сопряжения акустических полей на границах раздела областей приобретают вид:

$$\begin{cases} \frac{dW^{(s)}}{dt} = -\frac{d\Phi_1}{dr_s}, \\ 0 \leq |\phi_s| \leq \pi, r_{0s} = r_{1s}, s = 1, \dots, N; \\ \frac{dW^{(s)}}{dt} = -\frac{d\Phi_2^{(s)}}{dr_s}, \\ 0 \leq |\phi_s| \leq \pi, r_{0s} = r_{2s}, s = 1, \dots, N; \\ \sigma_r^{(s)} = q_r^{(s)} = -(p_1 - p_2^{(s)}), \\ 0 \leq |\phi_s| \leq \pi, s = 1, \dots, N; \end{cases} \quad (5)$$

где Φ_1 – полное поле излучения системы, выраженное в координатах s -го излучателя; Φ_2 – поле излучения во внутренней области s -го излучателя; $\sigma_r^{(s)}$ – нормальная составляющая тензора механических напряжений в пьезокерамике s -го излучателя; $p_1 = \rho \left(\frac{d\Phi_1}{dt} \right)$ и $p_2^{(s)} = \rho_s \left(\frac{d\Phi_2^{(s)}}{dt} \right)$ – радиационные нагрузки от динамического давления.

Электрические граничные условия (3) при динамическом деформировании цилиндрических излучателей электрическим напряжением $\Psi^{(s)}$ принимают вид [4]:

- напряженность электрического поля в материале пьезокерамической оболочки s -го излучателя при окружной поляризации:

$$E_\phi^{(0)s} = -\frac{M^{(s)} \Psi_0^{(s)}}{2\pi r_{0s}}, \quad (6)$$

где $M^{(s)}$ – число призм, из которых склеивается пьезокерамическая оболочка s -го излучателя;

- составляющие электрической индукции вдоль радиуса, продольной оси и окружности соответственно:

$$\begin{aligned} D_\phi^{(s)} &= \epsilon_{33}^{s(s)} E_\phi^{(s)} + e_{33}^{(s)} \left(\frac{dU^{(s)}}{d\phi_s \cdot r_{0s}} + \frac{W^{(s)}}{r_{0s}} \right); \\ D_r^{(s)} &= 0; D_z^{(s)} = 0; s = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (7)$$

Перечисленные механические и электрические условия дополняются условиями излучения на бесконечности и отсутствием особенностей во внутренних областях каждого из излучателей системы.

III. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Решение будем искать методом связанных полей в многосвязных областях. Для этого представим акустические поля следующими разложениями:



$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 = \sum_{s=1}^N \Phi_1^{(s)}; \quad s = 1, \dots, N; \\ \Phi_1^{(s)}(r_s, \varphi_s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^{(s)} H_n^{(1)}(kr_s) e^{in\varphi_s}; \\ \Phi_2^{(s)}(r_s, \varphi_s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n^{(s)} J_n(k_s r_s) e^{in\varphi_s}. \end{array} \right. \quad (8)$$

$$H_m^{(1)}(kr_q) e^{im\varphi_q} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(kr_s) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs}) \times e^{i(m-n)\varphi_{qs}} e^{in\varphi_s}, \quad (9)$$

где r_{qs} , и φ_s – полярные координаты начала координатной системы O_s в координатах q -й системы.

В соотношениях (8) использованы традиционные обозначения цилиндрических функций. Входящие в соотношения неизвестные коэффициенты $A_n^{(s)}$ и $B_n^{(s)}$ определяются из граничных условий (5) – (7). Необходимый для этого перенос систем координат осуществляется на основании теорем сложения для цилиндрических волновых функций [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_n^{(s)} H_n^{(1)'}(kr_{1s}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq s}}^N \sum_m A_m^{(q)} J_n'(kr_{1s}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs}) e^{i(m-n)\varphi_{qs}} = -\frac{\dot{W}_{0,\max}}{k}; \quad n = -\infty, 0, \infty; \\ \frac{e_{33}^{(s)}}{C_{33}^{E(s)}} \frac{M^{(s)} \Psi_0^{(s)}}{2\pi} + \frac{\alpha^{(s)} i \omega}{h_s} \rho \left[A_n^{(s)} H_n^{(1)}(kr_{1s}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq s}}^N \sum_m A_m^{(q)} J_n(kr_{1s}) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs}) e^{i(m-n)\varphi_{qs}} \right] = \\ = W_{0,\max} \left(1 - \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \omega^2 - \frac{\alpha^{(s)} \rho_s}{h_s} \omega^2 \right); \quad n = -\infty, 0, \infty; \quad s = 1, \dots, N, \end{array} \right. \quad (10)$$

где штрих означает производную функции по аргументу.

Неизвестные коэффициенты $B_n^{(s)}$ определяются из второго граничного условия системы (5) и равны

$$B_n^{(s)} = -\frac{\dot{W}_{0,\max}}{J_n'(k_s r_{2s})}. \quad (11)$$

Бесконечная система уравнений (10) заменой неизвестных $A_n^{(s)}$ новыми неизвестными $\tilde{A}_n^{(s)}$ по формуле $\tilde{A}_n^{(s)} = A_n^{(s)} \cdot H_n^{(1)'}(kr_{1s})$ может быть приведена к виду, разрешимому методом редукции или методом последовательных приближений.

Все члены системы (10) имеют ясный физический смысл. Свободные члены описывают частотно зависимые механические колебания излучателей системы. Двойные суммы характеризуют взаимодействие между излучателями в системе по акустическому полю, обусловленное многократным рассеянием волн на них. В них входит множитель $H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs})$, зависящий от расстояния между излучателями. Он описывает обмен волнами m -го и n -го порядков рассеяния между излучателями с номерами q и s , где $q = 1, \dots, N$ и $s = 1, \dots, N$ и $q = s$. При увеличении волнового расстояния kr_{qs} этот множитель уменьшается и роль взаимодействия снижается.

Члены системы, содержащие множитель $\Psi_0^{(s)}$, характеризуют способность преобразования электрической энергии, в электромеханическую, в пьезокерамическом преобразователе. Входящие в матричные элементы пары функций $J_n'(kr_{1s})$, $H_n^{(1)'}(kr_{1s})$ и $J_n(kr_{1s})$, $H_n^{(1)}(kr_{1s})$ описывают рассеивание звука одиночными цилиндрическими телами соответственно акустически жесткого и акустически мягкого типов при дифракции звуковых волн на них.

Из физических соображений и приведенных выражений ясно, что излучение звука рассматриваемой системой тел, представляет собой сложный физический процесс, включающий взаимодействие трех физических полей – электрического, механического и акустического, в процессе преобразования электрической энергии в акустическую в излучателях системы и двух видов взаимодействия в процессе излучения звука. Первый из последних двух видов представляет собой взаимодействие механического поля каждого излучателя с акустическими полями, создаваемыми излучателем во внутренней и внешней средах и отражает реакцию этих сред на возбуждение звука в них. Второй вид взаимодействия характерен только для акустического поля и обусловлен многократным обменом рассеянными и излученными волнами между телами системы.

В связи с изложенным особый интерес представляет детальное изучение свойств каждого из полей,



поскольку каждое из этих свойств определяющим образом может влиять на выбор и построение как самой системы излучателей, так и сопряженных с ней устройств при функционировании их в единой гидроакустической системе.

Знание параметров электрического поля позволяет осуществить согласование излучателей в составе системы с возбуждающими их генераторными устройствами, обеспечить максимальную подачу электрической энергии без опасности нарушения электрической прочности гидроакустического устройства в целом и тем самым повысить его энергетическую эффективность.

Знание параметров механического поля позволяет обеспечить максимальную энергетическую эффективность гидроакустического устройства в целом за счет правильного согласования системы излучателей с окружающими их средами, снижения уровня пиковых значений звукового давления в ближней зоне системы, для исключения возникновения кавитационных явлений в ней и создания приемлемых условий для рационального согласования входных электрических сопротивлений излучателей системы с выходными сопротивлениями возбуждающих их генераторных устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в работе анализ возможности излучения гидроакустическим устройством максимальной акустической мощности показал, что физическими факторами, ограничивающими такую возможность, являются динамическая механическая прочность, электрическая прочность и тепловая прочность излучателей.

Установлено, что одним из вариантов технической реализации излучения максимальной мощности системой пьезокерамических излучателей без их механического разрушения является обеспечения одинаковой колебательной скорости всех излучателей системы, близкой к предельно допустимой, выше которой наступает механическое разрушение излучателей.

При решении сформулированной задачи излучения максимальной акустической мощности произвольной системой, образованной из конечного числа круговых цилиндрических пьезокерамических излучателей, использован метод связанных полей в много связанных областях. Использование данного метода позволило свести решение задачи к решению бесконечной системы линейных алгебраических уравне-

ний относительно неизвестных электрических напряжений, возбуждающих излучатели системы, и неизвестных коэффициентов разложения акустических полей в ряды по волновым цилиндрическим функциям.

Получение количественных оценок параметров физических полей систем преобразователей с помощью предложенного подхода позволит повысить энергетическую эффективность систем пьезокерамических излучателей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] V. S. Didkovskiy, S. M. Poroshyn, O. H. Leiko, A. O. Leiko, and O. I. Drozdenko, *Konstruiuvannia elektroakustichnykh pryladiv i system dlia multymediiynykh akustichnykh tekhnolohii* [Construction of the electroacoustic devices and systems for multimedia acoustic technology]. Kyiv, Ukraine: NTUU "KPI," 2013. ISBN: 966-8861-43-4
- [2] V. V. Bogorodskiy, L. A. Zubarev, E. A. Korepin and V. I. Yakushev, *Podvodnyye elektroakusticheskiye preobrazovateli. (Raschet i proyektirovaniye)* [Underwater electroacoustic transducers. (Calculation and design)], Leningrad, USSR: Sudostroenie, 1983.
- [3] V. T. Grinchenko, I. V. Vovk and V. T. Matsypura, *Volnovyye zadachi akustiki* [Acoustic wave problems]. Kyiv, Ukraine: Interservis, 2013. ISBN: 978-617-696-166-6.
- [4] A. Leiko, A. Nizhnik and N. Bogdanova, "Osobennosti elektromekhanicheskogo preobrazovaniya energii tsilindricheskim pyezokeramicheskim izluchatelem v sostave sistemy izluchateley [Features of electromechanical energy conversion by a cylindrical piezoceramic radiator in the system of radiators]", *Bulgarian Journal for Engineering Design*, vol. 29, pp. 15-22, 2016.
- [5] O. H. Leiko and Y. I. Starovoi, "Chastotni vlastyivosty elektrychnykh poliv tsylindrychnoyi systemy p'yezokeramichnykh vyprominyuvachiv z ekranom u vnutrishniy polosti [Frequency properties of electric fields of a cylindrical system of piezoceramic emitters with a screen in the inner cavity]", *Journal Nano- and Electronic Physics*, vol. 8, no. 4, pp. 04018-04018-6, 2016. DOI: [10.21272/jnep.8\(4\(1\)\).04018](https://doi.org/10.21272/jnep.8(4(1)).04018).
- [6] I. V. Vovk and V. N. Oliynik, "Sound radiation by a cylindrical piezoelastic shell with an asymmetric insertion", *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 99, pp. 133-138, 1996.
- [7] I. V. Vovk, V. T. Grinchenko and V. N. Oliynik, "On the method of construction of a directed low-frequency hydroacoustic radiator", *Proceeding of the 2-nd European Conference on Underwater Acoustics*, Lyngby, Denmark, pp. 573-578, 1994.
- [8] E. A. Ivanov, *Difraktsiya elektromagnitnykh voln na dvukh telakh* [Diffraction of electromagnetic waves on two bodies]. – Minsk, USSR: Nauka i tekhnika, 1968.

Надійшла до редакції 17 січня 2018 р.

УДК 534.232; 534.231

Випромінювання максимальної акустичної потужності системами гідроакустичних



циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів з окружною поляризацією

Дрозденко О. І., к. т. н. доц., ORCID [0000-0001-6647-1428](https://orcid.org/0000-0001-6647-1428)
e-mail oi.drozdenko@aae.kpi.ua

Лейко О. Г., д. т. н. проф., ORCID [0000-0002-5588-6449](https://orcid.org/0000-0002-5588-6449)
e-mail og.leiko@aae.kpi.ua

Кафедра акустики та акустoeлектроніки acoustic.kpi.ua
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua
Київ, Україна

Реферат—Для довільних систем гідроакустичних випромінювачів проаналізовані ті фізичні фактори, які обмежують можливості випромінювання максимальної акустичної потужності такими системами. До них віднесені механічна, електрична та теплова міцності випромінювачів систем. Для механічної міцності п'єзокерамічних випромінювачів визначені можливі фізичні причини, що обмежують її величину, і на основі їхнього аналізу запропонований ряд можливих підходів, технічна реалізація яких дозволяє підвищити акустичну потужність, випромінювану системою. Для одного із цих підходів, пов'язаного з організацією в системі однакової коливальної швидкості випромінювачів, близької до гранично можливої для їхнього механічного руйнування, сформульована і методом зв'язаних полів у багатозв'язних областях вирішена задача випромінювання довільною системою, утвореною з кінцевого числа гідроакустичних циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів з окружною поляризацією, максимальної акустичної потужності.

Бібл. 8, рис. 1.

Ключові слова — система випромінювачів; циліндричний п'єзокерамічний випромінювач; механічна міцність.

UDC 534.232; 534.231

Radiation of Maximum Acoustic Power by Systems of Hydroacoustic Cylindrical Piezoceramic Transducers with Circular Polarization

O. I. Drozdenko, PhD, Assoc.Prof., ORCID [0000-0001-6647-1428](https://orcid.org/0000-0001-6647-1428)
e-mail oi.drozdenko@aae.kpi.ua

O. H. Leiko, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0002-5588-6449](https://orcid.org/0000-0002-5588-6449)
e-mail og.leiko@aae.kpi.ua

Department of Acoustics and Acoustoelectronics acoustic.kpi.ua
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" kpi.ua
Kyiv, Ukraine

Abstract—Electroacoustic devices and systems are widely used in the modern world. Among these devices it is necessary to select those that are intended for work in water - hydroacoustic devices. The main reason why these devices need to be singled out separately is the difficult operating conditions in which they work. Any hydroacoustic device is designed to work with certain power capabilities within a given time interval in the specified operating conditions. However, there are a number of physical factors that limit these opportunities. These factors can be divided into internal and external. For hydroacoustic devices with sound emission, internal limiting physical factors are dynamic mechanical, electrical and thermal strength. External factors include the cavitation strength of the environment in which the system operates.

Piezoceramic transducers are the nodes that carry out an mutual conversion of electrical and acoustic energy. The active elements of transducers have the lowest strength and are most susceptible to the influence of operational factors. Among the



physical factors limiting the power capabilities of hydroacoustic transducers on the first place it is necessary to deliver mechanical strength.

The purpose of this article is to solve the problem of arbitrary system formed by a finite number of circular cylindrical piezoceramic transducers with circular polarization sound emission, on condition of their maximum mechanical dynamic strength providing. Such solution will allow hydroacoustic systems with maximum levels of radiated acoustic power designing.

In this article, the physical factors that limit the acoustic power maximum radiation possibility of arbitrary hydroacoustic emitters systems were analysed. They include mechanical, electrical and thermal strength of emitters systems. For the mechanical strength of piezoceramic emitters, the reasons limiting their magnitude have been determined. On the basis of their analysis the possible variants which technical implementation allows increasing the acoustic radiating power were proposed. It becomes possible if in the system of emitters oscillatory speed is the same and close to the maximum possible one without their mechanical destruction. For this variant the problem of maximum acoustic power radiation is formulated and solved by the method of coupled fields in multiply connected domains. In this case, the system of emitters can be arbitrary, formed by a finite number of hydroacoustic cylindrical piezoceramic emitters with circular polarization. Different ways of the considered emitters systems energy efficiency increasing were analyzed because of their physical fields parameters quantitative estimates obtaining possibility.

Ref. 8, fig. 1.

Keywords — radiator system; cylindrical piezoceramic radiator; mechanical strength.

