

УДК 539.1

И.В. Кандрачук

Национальный технический университет Украины (КПИ), Киев

## РАСЧЕТ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ, ФОРМИРУЕМОГО СИСТЕМОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ЭКРАНА

Рассмотрена задача о взаимодействии плоских акустических волн с криволинейной цилиндрической системой, образованной из круговых цилиндрических преобразователей и акустического экрана конечной звукопрозрачности. Решение получено с учетом связанности акустических, механических и электрических полей в каждом преобразователе и взаимного влияния многократно отраженных волн всеми элементами системы. Приведены аналитические соотношения, позволяющие рассчитать параметры всех полей, возникающих в процессе работы системы.

**Ключевые слова:** преобразователь, акустическая волна, акустический экран, акустическое поле, механическое поле, электрическое поле.

### Введение

Большое число устройств технической акустики, в особенности, гидроакустики, содержит акустические антенны, представляющие собой криволинейные системы, образованные из электроакустических преобразователей и акустического экрана. Преобразователи могут быть выполнены в виде тонкостенных круговых цилиндрических пьезокерамических оболочек, протяженность которых превышает длину рабочей волны в окружающей систему среде. Акустические экраны обычно выполняются из материала конечной звукопрозрачности. В частности, для работы в жидкости в качестве таких экранов чаще всего применяются звукоотражающие резины, например, марки 10087 или марки 51-1415, свойства которых изменяются под действием гидростатического давления. Обычно в системе экран размещается с той стороны кривой линии, которая образует внутреннюю полость системы. При изучении свойств систем рассматриваемого типа используются различные модельные представления как для преобразователей [1], так и для экранов.

В тех случаях, когда размеры преобразователей и экранов соизмеримы с длиной волны, свойства рассматриваемых систем существенно зависят от дифракционных эффектов [2].

**Целью данной работы** является постановка и решение сопряженной задачи электроакустики, состоящей в изучении взаимодействия плоской акустической волны с криволинейной цилиндрической решеткой, образованной из тонкостенных пьезокерамических цилиндрических преобразователей и акустического экрана конечной звукопрозрачности.

### Постановка задачи

Рассматривается система из конечного числа  $N$  погруженных в безграничное пространство жидкости тонкостенных пьезокерамических преобразователей, оси которых равноудалены на расстояние

$L$  от точки  $O$ , т.е. преобразователей, образующих криволинейную антенную решетку. Число электроупругих цилиндров, их геометрические размеры и расположение, в общем случае, произвольны.

Во внутренней полости антенной решетки находится цилиндрический столб жидкости (акустический экран), ось которого проходит через точку  $O$ . Нормальное сечение рассматриваемой системы приведено на рис. 1. Среды, заполняющие указанный цилиндрический объем и безграничное внешнее пространство, имеют разные физические параметры и не перемешиваются.

Преобразователи являются бесконечно длинными (плоская задача), тонкостенными, имеют радиальную поляризацию и сплошные электродированные покрытия на наружной и внутренней поверхностях и могут содержать жидкость во внутренних объемах.

Гидроэлектроупругая система возбуждается плоской волной давления с периодическим законом изменения во времени.

Изучаемый динамический процесс моделируется в предположении, что для описания движения элементов антенной решетки оправдано привлечение теории тонких пьезокерамических оболочек, основанной на гипотезах Кирхгофа-Лява, а жидких сред – акустической теории.

Рассмотрим варианты, когда токопроводящие покрытия на внутренней и внешней поверхностях преобразователей закорочены, разомкнуты или замкнуты через нагрузочное сопротивление.

Введем полярные координаты  $r_k$ ,  $\theta_k$  (рис. 1), связанные с каждой из электроупругих оболочек ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) и акустическим цилиндром ( $k = N + 1$ ). Исходными для сформулированной задачи гидроэлектроупругости является следующая система соотношений, включающая:

– уравнения движения тонкостенных пьезокерамических оболочек:

$$\begin{aligned} & (1 + \beta_k^2 \mu_k) \frac{\partial^2 U^{(k)}}{\partial \theta_k^2} + \frac{\partial W^{(k)}}{\partial \theta_k} - \\ & - \beta_k^2 \mu_k \frac{\partial^3 W^{(k)}}{\partial \theta_k^3} - \frac{R_k^2}{c_{pk}^2} \frac{\partial^2 U^{(k)}}{\partial t^2} = 0; \\ & \frac{\partial U^{(k)}}{\partial \theta_k} - \beta_k^2 \mu_k \frac{\partial^3 U^{(k)}}{\partial \theta_k^3} + W^{(k)} + \\ & + \beta_k^2 \mu_k \frac{\partial^4 W^{(k)}}{\partial \theta_k^4} - R_k (1 + \nu_k) d_{31k} t_2^{(k)} + \\ & + \frac{R_k}{c_{pk}^2} \frac{\partial^2 W^{(k)}}{\partial t^2} = \frac{S_{11k}^E (1 - \nu_k^2) R_k^2}{h_k} q^{(k)}, \end{aligned} \quad (1)$$

(k = 1, 2, ..., N);

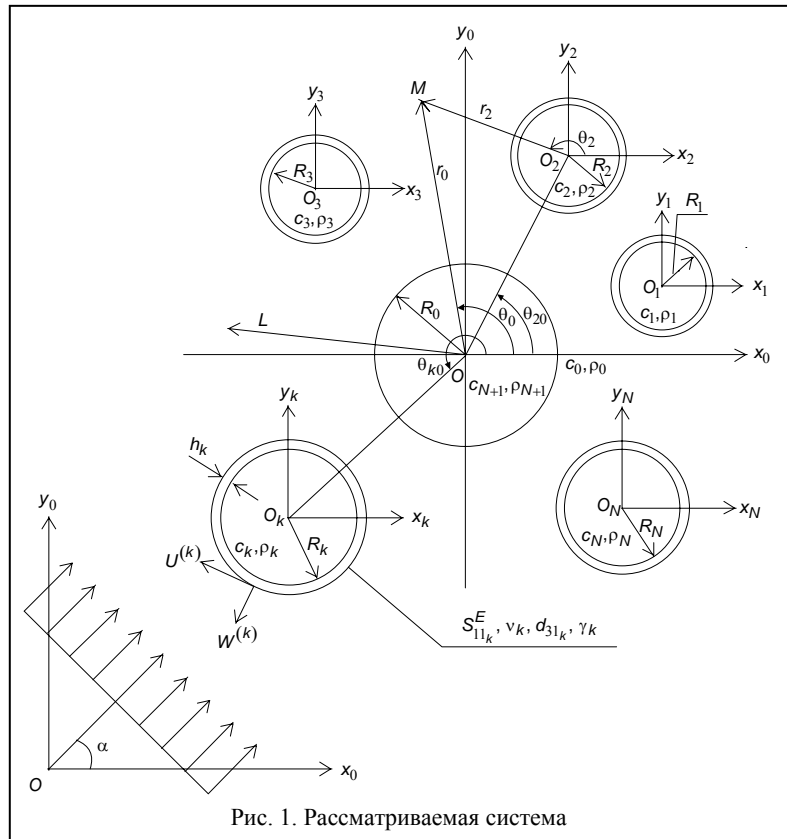
– уравнения, описывающие волновые процессы в жидкостях, вне и во внутренних объемах преобразователей и в акустическом экране:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \varphi^{(0)}}{\partial t_1^2} + \frac{1}{r_1} \frac{\partial \varphi^{(0)}}{\partial t_1} + \frac{1}{r_1^2} \frac{\partial^2 \varphi^{(0)}}{\partial \theta_1^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi^{(0)}}{\partial t^2}; \\ & \frac{\partial^2 \varphi^{(i)}}{\partial t_1^2} + \frac{1}{r_i} \frac{\partial \varphi^{(i)}}{\partial t_1} + \frac{1}{r_i^2} \frac{\partial^2 \varphi^{(i)}}{\partial \theta_1^2} = \frac{1}{c_i^2} \frac{\partial^2 \varphi^{(i)}}{\partial t^2}; \\ & \frac{\partial^2 \varphi^{(N+1)}}{\partial t_0^2} + \frac{1}{r_0} \frac{\partial \varphi^{(N+1)}}{\partial t_0} + \frac{1}{r_0^2} \frac{\partial \varphi^{(N+1)}}{\partial \theta_0^2} = \\ & = \frac{1}{c_{N+1}^2} \frac{\partial^2 \varphi^{(N+1)}}{\partial t^2}; \end{aligned} \quad (2)$$

– зависимость между акустическими нагрузками, действующими на оболочки, и давлениями в акустических средах:

$$P^{(0)} = -\rho_0 \frac{\partial [\varphi^{(0)} + \phi]}{\partial t}; \quad P^{(i)} = -\rho_i \frac{\partial \varphi^{(i)}}{\partial t} \quad (i = N+1). \quad (3)$$

Здесь  $U^{(k)}$ ,  $W^{(k)}$  – тангенциальная и нормальная составляющие вектора перемещений  $k$  оболочки;  $q^{(k)}$  – действующая на нее акустическая нагрузка;  $E_r^{(k)}$  – напряженность электрического поля;  $\beta_k$ ,  $\mu_k$ ,  $c_{pk}$  – постоянные, которые выражаются через параметры  $k$  оболочки: модули упругости  $S_{11k}^E$ ,  $\nu_k$ , пьезомодуль  $d_{31k}$ , плотность материала  $\gamma_k$ , а также ее толщину  $h_k$  и радиус  $R_k$ ;  $\varphi^{(i)}$  – потенциал скоростей акустических волн, отраженных и излученных во внешнюю среду ( $i=0$ ) и распространяющихся во внутреннем объеме  $i$  оболочки ( $i=1, 2, \dots, N$ ) и в цилиндрическом объеме, содержащемся внутри антенной решетки ( $i=N+1$ );  $\phi$  – потенциал скоростей падающей волны;  $P^{(i)}$  – соответствующее акустическое давление;



ние;  $c_i$ ,  $\rho_i$  – физические параметры (скорость звука и плотность) акустических сред,  $t$  – время;  $\beta_k$ ,  $\mu_k$ , и  $c_{pk}$  – постоянные, равные соответственно:

$$\begin{aligned} \beta_k &= \frac{h_k^2}{12R_k^2}; \quad \mu_k = 1 + \frac{1 + \nu_k}{2} \frac{k_{pk}^2}{1 - k_{pk}^2}; \\ c_{pk}^2 &= \frac{1}{\gamma_k S_{11k}^E (1 - \nu_k^2)}; \quad k_{pk} = \frac{2}{1 - \nu_k} \frac{d_{31k}^2}{S_{11k}^E \epsilon_{33k}^T}; \end{aligned}$$

$\epsilon_{33k}^T$  – электрическая проницаемость материала  $k$  преобразователя;  $k_{pk}$  – его планарный коэффициент электромеханической связи;  $\gamma_k$  – плотность пьезокерамики.

Различным вариантам коммутации электродов преобразователей соответствуют следующие зависимости:

– при замкнутых электродах

$$E_r^{(k)} = 0; \quad (5)$$

– при разомкнутых электродах

$$I^{(k)} = 0; \quad (6)$$

– при замкнутых через нагрузочное сопротивление  $Z_n^{(k)}$  электродах

$$I^{(k)} = E_r^{(k)} h_k / Z_n^{(k)}, \quad (7)$$

где  $I^{(k)}$  – динамический ток смещения в пьезокерамике, приходящийся на поверхность оболочки единичной высоты и равный [3]

$$I^{(k)} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_0^{2\pi} \frac{d_{31k}}{S_{11k}^E (1 - \nu_k^2)} \cdot \frac{1}{R_k} \left( \frac{\partial U^{(k)}}{\partial \theta_k} + \frac{W^{(k)}}{R_k} \right) R_k d\theta_k. \quad (8)$$

Граничными для сформулированной задачи являются условия, обеспечивающие безотрывный контакт преобразователей с акустическими средами:

$$\left. \frac{\partial W^{(k)}}{\partial t} = \frac{\partial [\varphi^{(0)} + \phi]}{\partial r_k} \right|_{r_k=R_k}; \quad \left. \frac{\partial W^{(k)}}{\partial t} = \frac{\partial \varphi^{(k)}}{\partial r_k} \right|_{r_k=R_k}, \quad (9)$$

а также среды, заполняющей безграничное внешнее пространство, с акустическим экраном:

$$\left. \frac{\partial [\varphi^{(0)} + \phi]}{\partial r_{N+1}} \right|_{r_{N+1}=R_{N+1}} = \left. \frac{\partial \varphi^{(N+1)}}{\partial r_{N+1}} \right|_{r_{N+1}=R_{N+1}}; \quad (10)$$

$$\rho_0 \left. \frac{\partial [\varphi^{(0)} + \phi]}{\partial t} \right|_{r_{N+1}=R_{N+1}} = \rho_{N+1} \left. \frac{\partial \varphi^{(N+1)}}{\partial t} \right|_{r_{N+1}=R_{N+1}}.$$

Для установившихся во времени процессов необходимо выполнение условия Зоммерфельда для потенциала скоростей отраженных и излученных волн  $\varphi^{(0)}$ . Кроме того, учитывая, что в замкнутых объемах ( $r_i < R_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N+1$ ) нет источников, потенциалы скоростей  $\varphi^{(i)}$ , описывающие возникающие в них возмущения, должны быть ограничены.

Потенциал скоростей  $\phi$ , описывающий падающую плоскую волну давления, распространяющуюся под углом  $\alpha$  к осям  $O_k X_k$  декартовых координат (рис. 1), задается функцией, которая в переменных  $r_k$ ,  $\theta_k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) и  $r_{N+1}$ ,  $\theta_{N+1}$  имеет вид:

$$\phi(r_k, \theta_k, t) = Q e^{-i\omega t + i \frac{\omega}{c_0} [L \cos(\theta_{k0} - \alpha) + r_k \cos(\theta_k - \alpha)]}, \quad (11)$$

$$\phi(r_0, \theta_0, t) = \phi(r_{N+1}, \theta_{N+1}, t) = Q e^{-i\omega t + i \frac{\omega}{c_0} r_{N+1} \cos(\theta_{N+1} - \alpha)}.$$

В приведенных выражениях,  $Q$  – амплитуда действующей волновой нагрузки,  $\theta_{k0}$  – угловая координата  $O_k$  в системе координат  $(r_0, \theta_0)$ .

### Метод решения

Для процессов, установившихся во времени, неизвестные величины  $W^{(k)}$ ,  $U^{(k)}$ ,  $\varphi^{(0)}$ ,  $\varphi^{(k)}$ ,  $\varphi^{(N+1)}$  будем искать в виде рядов по собственным формам колебаний:

$$W^{(k)} = e^{-i\omega t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} W_n^{(k)} e^{in\theta_k}, \quad (k = 1, 2, \dots, N); \quad (12)$$

$$U^{(k)} = e^{-i\omega t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} U_n^{(k)} e^{in\theta_k};$$

$$\varphi^{(0)} = e^{-i\omega t} \sum_{k=1}^{N+1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \varphi_{nk}^0(r_k) e^{in\theta_k}; \quad (13)$$

$$\varphi^{(k)} = e^{-i\omega t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \varphi_n^{(k)}(r_k) e^{in\theta_k}; \quad (14)$$

$$\varphi^{(N+1)} = e^{-i\omega t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \varphi_n^{(N+1)}(r_0) e^{in\theta_0}. \quad (15)$$

Здесь компоненты потенциала скоростей  $\varphi^{(0)}$  описывают возмущения во внешнем пространстве, обусловленные пьезокерамическими оболочками ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) и акустическим экраном ( $k = N+1$ ).

С учетом условий излучения Зоммерфельда для возмущений в замкнутых объемах  $r_k < R_k$  ( $k = 1, \dots, N+1$ ) общие решения волновых уравнений (2) имеют вид:

$$\varphi^{(0)} = e^{-i\omega t} \sum_{k=1}^{N+1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^{(k)} H_n^{(1)} \left( \frac{\omega}{c_0} r_k \right) e^{in\theta_k};$$

$$\varphi^{(k)} = e^{-i\omega t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n^{(k)} J_n \left( \frac{\omega}{c_k} r_k \right) e^{in\theta_k}, \quad (k = 1, 2, \dots, N);$$

$$\varphi^{(N+1)} = e^{-i\omega t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} B_n^{(N+1)} J_n \left( \frac{\omega}{c_{N+1}} r_0 \right) e^{in\theta_0}, \quad (16)$$

где  $H_n^{(1)}$ ,  $J_n$  – функции  $n$  порядков Ханкеля первого рода и Бесселя,  $A_n^{(k)}$ ,  $B_n^{(k)}$ ,  $B_n^{(N+1)}$  – постоянные интегрирования, которые находятся из граничных условий.

Поскольку звуковые поля, отраженные и излученные каждой пьезокерамической оболочкой и экраном, заданы в своих локальных координатных системах, для представления потенциала  $\varphi^{(0)}$  в одной, связанной с каждым из цилиндров системе координат, воспользуемся теоремой сложения для цилиндрических волновых функций:

$$H_n^{(1)} \left( \frac{\omega}{c_0} r_j \right) e^{in\theta_j} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} H_{n-m}^{(1)} \left( \frac{\omega}{c_0} L_{kj} \right) \times$$

$$\times J_m \left( \frac{\omega}{c_0} r_k \right) e^{i(n-m)\theta_{kj}} e^{im\theta_k}, \quad (17)$$

где  $L_{kj}$ ,  $\theta_{kj}$  – координаты центра  $\theta_k$  полярной системы  $(r_k, \theta_k)$  в  $j$  системе. Отметим, что равенство (17) справедливо при  $r_k < L_{kj}$ .

Используя теорему сложения (17) для волновой функции  $H_n^{(1)} \left( \frac{\omega}{c_0} r_j \right) e^{in\theta_j}$ , выполним переразложение потенциала скоростей  $\varphi^{(0)}$ , представив его в переменных каждой из координатных систем  $r_k$ ,  $\theta_k$  ( $k = 1, \dots, N+1$ ):

$$\varphi^{(0)}(r_k, \theta_k) =$$

$$= e^{-i\omega t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} & A_n^{(k)} H_n^{(1)} \left( \frac{\omega}{c_0} r_k \right) + \\ & + \sum_{j=1}^{N+1} \sum_{\substack{m=-\infty \\ j \neq k}}^{\infty} A_m^{(j)} H_{m-n}^{(1)} \cdot \\ & \times e^{i(m-n)\theta_{kj}} \end{aligned} \right\} \times e^{in\theta_k}, \quad (18)$$

где  $\theta_{kj}$ ,  $L_{kj}$  ( $k \neq j$ ) – угловая и радиальная координаты центра полярной системы.

Разложение потенциала (11) падающей волны  $\phi$  в ряд Фурье в принятых координатных системах имеет вид:

$$\begin{aligned} \phi(r_k, \theta_k, t) &= Q e^{-i\omega t + i \frac{\omega}{c_0} L \cos(\theta_{k0} - \alpha)} \times \\ &\times \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n \left( \frac{\omega}{c_0} r_k \right) e^{-in\alpha} e^{in\theta_k}, \quad (k = 1, 2, \dots, N); \\ \phi(r_{N+1}, \theta_{N+1}, t) &= \phi(r_0, \theta_0, t) = \\ &= Q e^{-i\omega t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n \left( \frac{\omega}{c_0} r_0 \right) e^{-in\alpha} e^{in\theta_0}. \end{aligned} \quad (19)$$

Акустические давления на поверхностях контакта пьезокерамических оболочек с акустическими средами ( $r_k = R_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ ) и на границе соприкосновения внешней среды с акустическим экраном ( $r_0 = R_0$ ) согласно соотношений (4), (6), (8), (19) также описываются рядами:

$$\begin{aligned} P_0^{(0)} &= P^{(0)} \Big|_{r=R_0} = \\ &= e^{-i\omega t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_n^{(0)}(R_0) e^{in\theta_0} \quad (i = 1, \dots, N+1); \\ P_0^{(k)} &= P^{(k)} \Big|_{r=R_k} = \\ &= e^{-i\omega t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_n^{(k)}(R_k) e^{in\theta_k} \quad (k = 1, 2, \dots, N); \\ P_0^{(N+1)} &= P^{(N+1)} \Big|_{r_0=R_0} = \\ &= e^{-i\omega t} \sum_{n=-\infty}^{\infty} P_n^{(N+1)}(R_0) e^{in\theta_0}, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $P_n^{(0)}(R_k)$ ,  $P_n^{(N+1)}(R_0)$ ,  $P_n^{(k)}(R_k)$ ,  $P_n^{(N+1)}(R_0)$  – давления на соответствующих поверхностях.

Эти соотношения позволяют записать действующие на оболочки нагрузки  $q^{(k)}$  в соответствии с выражением (3).

В случае пьезокерамических преобразователей со сплошными токопроводящими покрытиями для рассмотренных вариантов их коммутации напряженность электрического поля  $E_r^{(k)}$  не зависит от пространственных координат  $r_k$ ,  $\theta_k$ :

$$E_r^{(k)} = e^{-i\omega t} E_0^{(k)} \quad (21)$$

и пропорциональна нулевой компоненте прогиба  $W_0^{(k)}$ :

$$E_0^{(k)} = a_k W_0^{(k)}, \quad (22)$$

где постоянная  $a_k$  принимает следующие значения:

– при закороченных электродах  $a_k = 0$ ; (23)

– при разомкнутых электродах  $a_k = -\frac{1}{2d_{31k} R_k} \cdot \frac{K_{pk}^2}{1 - K_{pk}^2}$ ; (24)

– при замкнутых через нагрузочное сопротивление  $Z_n^{(k)}$  электродах

$$\begin{aligned} a_k &= -\frac{1}{S_{11k}^E (1 - \nu_k)} \times \\ &\times \frac{i 2\pi\omega d_{31k} Z_n^{(k)}}{\left[ h_k - i 2\pi\omega E_{33k}^T (1 - k_{pk}^2) Z_n^{(k)} R_k \right]}. \end{aligned} \quad (25)$$

Далее, решая уравнения движения оболочек относительно гармоник перемещений  $W_n^{(k)}$ ,  $U_n^{(k)}$ , выразим их через составляющие акустических нагрузок  $q_n^{(k)}$ . Указанные зависимости приобретают вид:

$$W_n^{(K)} = \frac{\lambda_{nk}^{(1)} \lambda_{nk}^{(5)}}{\lambda_{nk}^{(1)} \lambda_{nk}^{(4)} + \lambda_{nk}^{(2)} \lambda_{nk}^{(3)}} q_n^{(K)}; \quad (26)$$

$$U_n^{(K)} = -i \frac{\lambda_{nk}^{(2)} \lambda_{nk}^{(5)}}{\lambda_{nk}^{(1)} \lambda_{nk}^{(4)} + \lambda_{nk}^{(2)} \lambda_{nk}^{(3)}} q_n^{(K)}. \quad (27)$$

Для определения постоянных интегрирования, входящих в выражения (16), соотношения (16), (18), (20) и (26) подставляются в граничные условия (9) и (10). В результате ряда преобразований вычисление искомых величин  $A_n^{(k)}$  и  $B_n^{(k)}$ , ( $k = 1, 2, \dots, N+1$ ) сводится к решению следующей бесконечной системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} A_n^{(k)} + \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_{nm1}^{(kj)} A_m^{(j)} + G_{nl}^{(k)} B_n^{(k)} &= Q U_{n1}^{(k)}; \\ G_{n2}^{(k)} A_n^{(k)} + \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_{nm2}^{(kj)} A_m^{(j)} + B_n^{(k)} &= \end{aligned} \quad (28)$$

$$= Q U_{n2}^{(k)} \quad (k = 1, 2, \dots, N);$$

$$\begin{aligned} A_n^{(N+1)} + \sum_{j=1}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_{nm1}^{(N+1)} A_m^{(j)} + G_{n1}^{(N+1)} B_n^{(N+1)} &= \\ = Q U_{n1}^{(N+1)}; \end{aligned}$$

$$G_{n2}^{(N+1)} A_n^{(N+1)} + \sum_{j=1}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_{nm2}^{(N+1)} A_m^{(j)} + B_n^{(N+1)} = \\ = QU_{n2}^{(N+1)}.$$

Если пьезопреобразователи не содержат акустических сред во внутренних объемах, бесконечная система (28) упрощается, принимая вид:

$$A_n^{(k)} + \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq k}}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_{nml}^{(kj)} A_m^{(j)} = QU_{n1}^{(k)} \quad (k = 1, 2, \dots, N);$$

$$A_n^{(N+1)} + \sum_{j=1}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_{nml}^{(N+1)} A_m^{(j)} + G_{n1}^{(N+1)} B_n^{(N+1)} = \\ = QU_{n1}^{(N+1)}; \quad (29)$$

$$G_{n2}^{(N+1)} A_n^{(N+1)} + \sum_{j=1}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_{nm2}^{(N+1)} A_m^{(j)} + B_n^{(N+1)} = \\ = QU_{n2}^{(N+1)}.$$

Можно показать, что системы (28) и (29) являются квазирегулярными и имеют единственное решение, которое может быть получено методом редукции [4].

Располагая значениями постоянных  $A_n^{(k)}$ ,  $B_n^{(k)}$ , нетрудно рассчитать физические характеристики изучаемого динамического процесса. Так, согласно выражению (20) определяются давления в акустических средах на поверхностях их контакта с оболочками, по формулам (3) – действующие на них акустические нагрузки и по соотношениям (26) и (27) – перемещения  $W^{(k)}$ ,  $U^{(k)}$ .

## Выводы

В статье поставлена задача и предложен метод расчета звуковых полей, формируемых криволинейной системой, образованной из круговых цилиндрических пьезокерамических преобразователей и акустического экрана конечной звукопрозрачности, при возбуждении системы плоскими волнами. В расчетной модели рассматриваемой системы учтены:

– взаимосвязанность между собой акустических, механических и электрических полей в каждом преобразователе;

– наличие многократного отражения звуковых волн в криволинейной системе и его влияние на звуковые поля, формируемые как каждым преобразователем, так и системой в целом;

– конечная прозрачность для звука акустического экрана.

Правильность полученных соотношений подтверждается тем, что в частном случае вырождения рассматриваемой системы в криволинейную систему без акустического экрана они совпадают с выражениями, приведенными в работах [2, 4].

## Список литературы

1. Закономерности плоской акустической волны с цилиндрической решеткой, состоящей из пьезокерамических цилиндрических преобразователей / А.Г. Лейко, В.Г. Савин, В.П. Ткаченко, Ю.Е. Шамарин // Акустичний вісник. – 2000. – Т. 3, № 1. – С. 51-60.

2. Лейко А.Г. Взаимодействие плоской акустической волны с цилиндрической решеткой, состоящей из пьезокерамических цилиндрических преобразователей / А.Г. Лейко, В.Г. Савин, В.П. Ткаченко // Акустичний вісник. – 1999. – Т. 2, № 2. – С. 69-76.

3. Грінченко В.Т. Электроупругость. Механика связанных полей в элементах конструкций (в 5-ти томах) / В.Т. Грінченко, А.Ф. Улитко, Н.Н. Шульга. – К.: Наукова думка, 1989. – Т. 5. – 280 с.

4. Лейко А.Г. Подводные акустические антенны. Методы расчета звуковых полей / А.Г. Лейко, Ю.Е. Шамарин, В.П. Ткаченко. – К.: Аванпостприм, 2000. – 320 с.

Поступила в редколлегию 14.11.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.М. Порошин, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

## РОЗРАХУНОК ЗВУКОВОГО ПОЛЯ, ЩО ФОРМУЄТЬСЯ СИСТЕМОЮ ЦИЛІНДРОВИХ П'ЄЗОКЕРАМІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ І ЕКРАНУ

І.В. Кандрачук

Розглянуто задачу про взаємодію плоских акустичних хвиль з криволінійною циліндричною системою, що утворена з кругових циліндричних перетворювачів та акустичного екрану кінцевої звукопрозорості. Рішення отримане з урахуванням зв'язаності акустичних, механічних та електричних полів в кожному перетворювачі та взаємного впливу багатократно відбитих хвиль усіма елементами системи. Наведені аналітичні співвідношення, що дозволяють розрахувати параметри всіх полів, які виникають в процесі роботи системи.

**Ключові слова:** перетворювач, акустична хвиля, акустичний екран, акустичне поле, механічне поле, електричне поле.

## CALCULATION OF THE SOUND FIELD, FORMED THE SYSTEM OF CYLINDRICAL PIEZOCERAMIC TRANSFORMERS AND SCREEN

I.V. Kandrachuk

A problem on interaction of plane acoustical waves with curved cylindrical system of circular cylindrical transducers and acoustic baffle of final transmittivity was stated and solved. Connection acoustical, mechanical and electrical fields in each transducer and mutual effects of waves reflected of all system elements were taken into account. Analytical formulas for calculation of field parameters arised during system work are presented.

**Keywords:** transmitter, acoustical wave, acoustical baffle, acoustical fields, mechanical fields, electrical fields.