

УДК 539.1

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛОСКОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ РЕШЕТКОЙ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

А. Г. ЛЕЙКО*, В. Г. САВИН**, В. П. ТКАЧЕНКО*, Ю. Е. ШАМАРИН*

* Государственный научно-исследовательский институт гидроприборов, Киев

** Национальный технический университет Украины "КПИ", Киев

Получено 30.07.1999 ◊ Пересмотрено 2.03.2000

Выполнен численный анализ связанных полей, возникающих в круговых и дуговых цилиндрических решетках, образованных из тонкостенных пьезокерамических цилиндрических преобразователей, при взаимодействии их с плоскими акустическими волнами. Установлены физические закономерности влияния этого взаимодействия на акустические, механические и электрические поля решеток в зависимости от параметров преобразователей, решеток и волн. Показано, что взаимодействие преобразователей в такой системе обуславливает потерю однородности угловой зависимости акустических, механических и электрических полей отдельных преобразователей, а также приобретение направленных свойств системой в целом. Установлена существенная роль внутренней области круговых решеток на формирование их диаграмм рассеяния.

Виконано чисельний аналіз зв'язаних полів, що виникають у кругових та дугових циліндричних ґратках, утворених із тонкостінних п'єзокерамічних циліндричних перетворювачів, при взаємодії їх з плоскими акустичними хвилями. Встановлені фізичні закономірності впливу цієї взаємодії на акустичні, механічні й електричні поля ґраток в залежності від параметрів перетворювачів, ґраток та хвиль. Показано, що взаємодія перетворювачів у такій системі обумовлює втрату однорідності кутової залежності акустичних, механічних та електричних полів окремих перетворювачів, а також набуття напрямлених властивостей системою в цілому. Показана суттєва роль внутрішньої області кругових ґраток на формування їхніх діаграм розсіяння.

A numerical analysis of conjugated fields, which appear in circular and arc cylindrical arrays consisting of thin-walled piezoelectric ceramic cylindrical transducers was performed for interaction of those arrays with plane acoustical waves. The physical regularities of influence of mentioned interaction on acoustical, mechanical and electrical fields of arrays were established in dependence from parameters of transducers, arrays and waves. It was shown that interaction of transducers in such system controls a loss of angular uniformity of acoustical mechanical and electrical fields of separate transducers as well, as an acquiring of directed properties by whole system. The significant role of the internal domain of circular arrays is shaping of their scattering diagrams was established.

ВВЕДЕНИЕ

Пьезокерамические преобразователи являются важнейшей составной частью многих устройств технической акустики и, в частности, гидроакустики. Их эффективная работа во многом определяет технические характеристики таких устройств. При изучении свойств систем, предназначенных для излучения и приема звуковых сигналов, используются различные модельные представления для преобразователей. Наиболее простым является подход, основанный на предположении о том, что элементы антенны могут рассматриваться как точечные (линейные) приемники или излучатели. Такой подход, очевидно, применим лишь для малых по сравнению с длиной волны преобразователей, получил широкое распространение [1]. Эффекты акустического взаимодействия между преобразователями в этом случае определяются лишь расстояниями между ними.

В тех случаях, когда размеры преобразователей

соизмеримы с длиной волны, свойства акустических антенн существенно зависят от дифракционных эффектов. Именно это обстоятельство послужило стимулом для появления большого числа работ, посвященных проблемам дифракции акустических и электромагнитных волн на системах рассеивателей различной формы. Начатые еще в шестидесятые годы [2, 3], эти исследования продолжаются и сейчас [4, 5]. При этом зачастую дифракционные задачи решаются в предположении об идеальности элементов антенн, считающихся акустически мягкими или жесткими. В работе [4] указан один из важных эффектов акустического взаимодействия – возникновение дополнительных сил, вызывающих движение элементов антенны как жестких тел. Однако, когда речь идет о пьезоактивных элементах антенн, возникновение обусловленных дифракцией дополнительных усилий на поверхности вызывает появление соответствующих электрических сигналов на выходе преобразователя. Эти сигналы могут оказаться суще-

ственными при работе в диапазоне, включающем собственные частоты электрически активных мод преобразователей. В связи с этим возникает необходимость в развитии подходов, учитывающих не только дифракционные эффекты, но и эффекты электромеханической связанности в элементах преобразователей.

Полный учет указанных эффектов возможен в рамках третьего подхода к анализу свойств антенн, при котором решается единая связанная задача об определении характеристик антенн с учетом электроупругих свойств их элементов и влияния дифрагированного поля на электрический отклик преобразователя. В рамках этого подхода исследования проводились как для установившихся, так и нестационарных режимов работы отдельных преобразователей и их систем. Из публикаций по этой проблематике выделим работы [6–11] для установившихся и [12–14] для нестационарных режимов излучения и приема акустических волн плоскими или соосными антенными решетками, состоящими из тонкостенных пьезокерамических цилиндрических преобразователей. Что касается исследований поведения пьезокерамических преобразователей, образующих антенные решетки другой конфигурации (отличные от плоской и соосной), то таких работ сравнительно мало [6].

Настоящая работа является продолжением статьи [6], в которой приведено полное аналитическое решение задачи о взаимодействии установившихся во времени акустических волн с криволинейной системой произвольных тонкостенных пьезокерамических цилиндрических преобразователей с учетом связанности акустических, механических и электрических полей в каждом преобразователе системы и взаимного влияния волн, многократно отраженных всеми элементами системы. Ниже приведены результаты численных исследований физических характеристик акустических, механических и электрических полей, создаваемых выбранными для исследования вариантами построения электроупругих систем при их взаимодействии с падающими плоскими волнами.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Прежде чем перейти непосредственно к анализу количественных данных, уместно вкратце напомнить математическую формулировку задачи.

Пусть плоская акустическая волна постоянной амплитуды падает на систему, состоящую из произвольного количества N бесконечно длинных параллельных тонкостенных цилиндрических пре-

образователей, содержащих жидкость во внутренних объемах. Предполагается, что в общем случае система состоит из различных по свойствам преобразователей, а внутренние полости цилиндров заполнены различными жидкостями. Преобразователи поляризованы в радиальном направлении, имеют сплошные электродированные покрытия на наружной и внутренней поверхностях и образуют антенную решетку так, что их оси параллельны и расположены на некоторой цилиндрической поверхности. Два рассматриваемых варианта таких решеток показаны на рис. 1. Системы координат, используемые для описания звукового поля и колебаний преобразователей, указаны в работе [6].

Для рассматриваемого случая плоской деформации (характеристики поля и деформации цилиндров не изменяются вдоль осей цилиндров) движение тонкостенных пьезокерамических оболочек описывается следующей системой уравнений теории, основанной на гипотезах Кирхгофа–Лява [16]:

$$\begin{aligned} (1 + \beta_k^2 \mu^2) \frac{\partial^2 U^{(k)}}{\partial \theta_k^2} + \frac{\partial W^{(k)}}{\partial \theta_k} - \\ - \beta_k^2 \mu_k \frac{\partial W^{(k)}}{\partial \theta_k} - \frac{R_k^2}{C_{pk}^2} \frac{\partial^2 U^{(k)}}{\partial t^2} = 0, \\ \frac{\partial U^{(k)}}{\partial \theta_k} - \beta_k^2 \mu_k \frac{\partial^3 U^{(k)}}{\partial \theta_k^3} + W^{(k)} + \\ + \beta_k^2 \mu_k \frac{\partial^4 U^{(k)}}{\partial \theta_k^4} + \frac{R_k^2}{C_{pk}^2} \frac{\partial^2 W^{(k)}}{\partial t^2} - \\ - R_k^2 (1 + \nu_k) d_{31,k} E_r^{(k)} = \\ = \frac{S_{11,k}^E (1 - \nu_k^2) R_k^2}{h_k} (p^{(k)} - p^0)_{r_k=R_k}, \\ k = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (1)$$

Входящие в уравнения (1) значения давления в звуковых полях с учетом потенциала падающего поля ψ определяются соотношениями

$$\begin{aligned} p^{(0)} &= -\rho_0 \frac{\partial (\varphi^{(0)} - \psi)}{\partial t}; \\ p^{(k)} &= -\rho_k \frac{\partial \varphi^{(k)}}{\partial t}. \end{aligned} \quad (2)$$

Потенциалы внешнего по отношению к решетке звукового поля $\varphi^{(0)}$ и звуковых полей внутри каждого цилиндра $\varphi^{(k)}$ удовлетворяют классическим волновым уравнениям, записанным в координатах

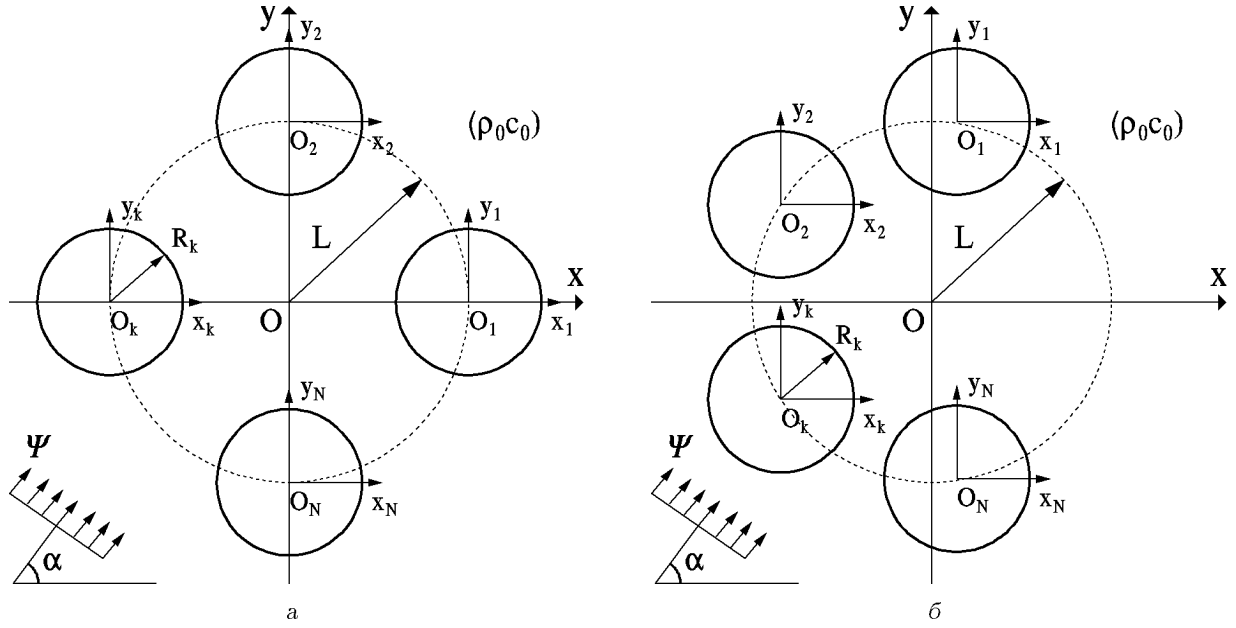


Рис. 1. Нормальное сечение круговой (а) и дуговой (б) цилиндрических решеток, образованных из пьезокерамических цилиндрических преобразователей

k -го цилиндра [17]:

$$\frac{\partial^2 \varphi^{(0)}}{\partial r_k^2} + \frac{1}{r_k} \frac{\partial \varphi^{(0)}}{\partial r_k^2} + \frac{1}{r_k^2} \frac{\partial^2 \varphi^{(0)}}{\partial \theta^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi^{(0)}}{\partial t^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi^{(k)}}{\partial r_k^2} + \frac{1}{r_k} \frac{\partial \varphi^{(k)}}{\partial r_k^2} + \frac{1}{r_k^2} \frac{\partial^2 \varphi^{(k)}}{\partial \theta^2} = \frac{1}{c_k^2} \frac{\partial^2 \varphi^{(k)}}{\partial t^2}.$$

Потенциал скоростей падающей под углом α волны (см. рис. 1) представим в виде

$$\psi = Q \exp \left\{ -i\omega t + i \frac{\omega}{c_0} \times \right. \\ \left. \times [L \cos(\theta_{k0} - \alpha) + r_k \cos(\theta_k - \alpha)] \right\}. \quad (4)$$

В уравнениях (1) $W^{(k)}$, $U^{(k)}$ – нормальные и тангенциальные составляющие вектора перемещений точек срединной поверхности k -ой оболочки; $E_r^{(k)}$ – напряженность возникающего в ней электрического поля. Геометрические и физические параметры в соотношениях (1) – (4) определяются

равенствами

$$\beta_k^2 = \frac{h_k^2}{12R_k^2};$$

$$\mu_k = 1 + \frac{1 + \nu_k}{2} \frac{\kappa_{p,k}^2}{1 - \kappa_{p,k}^2};$$

$$C_{pk}^2 = \frac{1}{\gamma_k S_{11,k}^E (1 - \nu_k^2)};$$

$$\kappa_{p,k}^2 = \frac{2}{1 - \nu_k} \frac{d_{31,k}^2}{S_{11,k}^E \varepsilon_{33,k}^T},$$

где $S_{11,k}^E$, ν_k , $d_{31,k}$, $\varepsilon_{33,k}^T$ – модуль упругости, пьезомодуль и электрическая проницаемость материала k -го преобразователя соответственно; $\kappa_{p,k}$ – его планарный коэффициент электромеханической связи; γ_k – плотность керамики; h_k , R_k – толщина и радиус срединной поверхности соответствующей оболочки; c_0 , ρ_0 , c_k , ρ_k – параметры внешней и внутренних акустических сред (скорость звука и плотность).

Исходную систему уравнений дополним граничными условиями, обеспечивающими безотрывный контакт преобразователей с акустическими среда-

ми:

$$\begin{aligned}\frac{\partial W^{(k)}}{\partial t} &= \frac{\partial [\varphi^{(0)} + \psi]}{\partial r_k} \Big|_{r_k=R_k}, \\ \frac{\partial W^{(k)}}{\partial t} &= \frac{\partial \varphi^{(k)}}{\partial r_k} \Big|_{r_k=R_k}.\end{aligned}\quad (5)$$

Решение поставленной задачи может быть осуществлено для различных вариантов коммутации электродов преобразователей (электрических граничных условий):

- электроды закорочены

$$E_r^{(k)} = 0, \quad (6)$$

- электроды разомкнуты ($a=0$) или замкнуты ($a=1$) через нагрузочное сопротивление $Z_n^{(k)}$

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

где $I^{(k)}$ – динамический ток смещения в пьезокерамике, приходящийся на единицу длины оболочки (погонный ток), равный [16]

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

Дополненные условиями излучения приведенные в этом разделе уравнения образуют полную систему, решение которой позволяет комплексно исследовать свойства рассеянных звуковых полей и электрические токи в цепях преобразователей.

2. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Выражения для перемещений оболочек и для потенциалов звуковых полей ищутся в виде рядов Фурье по окружным координатам [6]. Выполнив условия, обеспечивающие безотрывный контакт поверхностей оболочек с акустическими средами и воспользовавшись теоремой сложения цилиндрических волновых функций, для определения коэффициентов указанных рядов получаем бесконечную систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных постоянных $A_n^{(k)}$, $B_n^{(k)}$ ($n=1, 2, \dots, \infty$, $k=1, 2, \dots, N$):

$$\begin{cases} A_n^{(k)} + \sum_{j=1}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_{nm1}^{(kj)} A_m^{(j)} + G_{n1}^{(k)} B_n^{(k)} = Q U_{n1}^{(k)}, \\ G_{n2}^{(k)} A_n^{(k)} + \sum_{j=1}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} F_{nm2}^{(kj)} A_m^{(j)} + B_n^{(k)} = Q U_{n2}^{(k)}. \end{cases} \quad (9)$$

Здесь и далее штрих над суммой по j означает, что слагаемое $j=k$ отсутствует.

В работе [17] показано, что определитель бесконечной системы типа (9) является определителем нормального типа, а сама система имеет единственное решение, которое может быть получено методом редукции. С увеличением порядка усеченной системы можно добиться практической сходимости получаемых результатов, т.е. выполнять расчеты с контролируемой точностью. После вычисления постоянных $A_n^{(k)}$ и $B_n^{(k)}$ определяются интересующие физические характеристики динамического процесса. Ниже приведены формулы, по которым в дальнейшем осуществлялся расчет физических характеристик звуковых полей и параметров, описывающих движение и токи в преобразователях, для выбранных вариантов геометрии антенных решеток.

Вычисление нормальной к поверхности составляющей вектора смещений оболочки $W^{(k)}(\theta)$ проводится по формуле

$$\begin{aligned}W^{(k)} &= \exp(-i\omega t) \times \\ &\times \frac{\lambda_{nk}^{(1)} \lambda_{nk}^{(5)}}{\lambda_{nk}^{(1)} \lambda_{nk}^{(4)} + \lambda_{nk}^{(2)} \lambda_{nk}^{(3)}} q_n^{(k)} \exp(in\theta_k),\end{aligned}\quad (10)$$

где

$$\begin{aligned}q_n^{(k)} &= -i\omega \left\{ \rho_0 \left[A_n^{(k)} H_n^{(1)} \left(\frac{\omega}{c_0} R_k \right) + \right. \right. \\ &+ \sum_{j=1}^N \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^{(j)} H_{m-n}^{(1)} \left(\frac{\omega}{c_0} L_{kj} \right) J_n \left(\frac{\omega}{c_0} R_k \right) \times \\ &\times \exp[i(n-m)\theta_{kj}] \Big] - \rho_k B_n^{(k)} J_n \left(\frac{\omega}{c_0} R_k \right) + \\ &+ Q \exp \left(i \frac{\omega}{c_0} L \cos(\theta_0 - \alpha) \right) i^n J_n \left(\frac{\omega}{c_0} R_k \right) \Bigg\}.\end{aligned}\quad (11)$$

Давление $p^{(0)}$ в рассеянном решеткой поле во внешней акустической среде задается рядом

$$\begin{aligned}p^{(0)} &= \exp(-i\omega t) \left\{ i\omega \rho_0 \times \right. \\ &\times \sum_{k=1}^N \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^{(k)} H_n^{(1)} \left(\frac{\omega}{c_0} r_k \right) \exp(in\theta_k) + \\ &+ Q \exp \left(i \frac{\omega}{c_0} [L \cos \alpha + r_0 \cos(\theta_0 - \alpha)] \right) \Bigg\},\end{aligned}\quad (12)$$

На больших расстояниях от решетки (дальнее поле) с учетом асимптотических представлений для функций Ханкеля $H_n^{(1)}$ при больших значениях аргумента [17] вместо формулы (11) целесообразно

использовать следующее соотношение [6, 17]:

$$p_D^{(0)} = \exp(-i\omega t) i\omega \rho_0 \sum_{k=1}^N \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{2A_n^{(k)}}{\sqrt{\pi \frac{\omega}{c_0} r_k}} \times \\ \times \exp \left[i \left(\frac{\omega}{c_0} r_k - \frac{n\pi}{2} - \frac{\pi}{4} \right) \right] \exp(in\theta_k). \quad (13)$$

Электрическое напряжение на электродах преобразователей, замкнутых через нагрузочное сопротивление $Z_n^{(k)}$, вычисляется по формуле

$$V = - \sum_{k=1}^N \frac{\lambda_{nk}^{(2)} \lambda_{nk}^{(5)}}{\lambda_{nk}^{(1)} \lambda_{nk}^{(4)} + \lambda_{nk}^{(2)} \lambda_{nk}^{(3)}} \frac{1}{S_{11,k}^E (1 - \nu_k)} \times \\ \times \frac{2\pi i h_k d_{31,k} Z_n^{(k)} q_0^{(k)}}{h_k - 2\pi i \omega \varepsilon_{33,k} (1 - \kappa_{p,k}^2) Z_n^{(k)} R_k}. \quad (14)$$

Сама структура этого выражения отражает влияние взаимодействия по полю на электрический отклик пьезокерамического преобразователя в решетке. Напряжение на электродах отдельного преобразователя зависит от электрических условий на всех преобразователях решетки. Выражения для нерасшифрованных коэффициентов в формулах (9) – (13) приведены в работе [6].

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Применим полученные аналитические выражения (10) – (13) для установления физических закономерностей формирования акустических, механических и электрических полей, создаваемых двумя типами цилиндрических антенн – круговыми (см. рис. 1, а) и дуговыми (см. рис. 1, б) при возбуждении их плоскими волнами. В конкретных расчетах каждая из антенн образована из $N=4$ одинаковых круговых тонкостенных цилиндрических преобразователей с радиальной поляризацией и сплошными электродами, нанесенными на внешнюю и внутреннюю поверхности оболочек преобразователей. Все преобразователи в системах имеют одинаковый радиус $R_k = R = 0.0675$ м, толщину $h_k = h = 0.006$ м и выполнены из пьезокерамики состава ЦТБС-3 [15]. Центры нормальных сечений преобразователей расположены на окружности радиуса $L=5R$ либо равномерно по окружности (круговая система), либо равномерно по дуге с расстоянием между поверхностями соседних преобразователей $l_0=0.09R$. Системы преобразователей помещены в среду с параметрами $\rho_0=1000$ кг/м³, $c_0=1500$ м/с. Акустическая среда внутри преобразователей отсутствует. Падающие на них плоские волны имели частоты

$\omega=20000\pi$ рад/с и $\omega=8000\pi$ рад/с. Выбор таких частот был продиктован желанием исследовать поведение систем при возбуждении преобразователей как в области собственной частоты их пульсирующих колебаний в воздухе ($\omega=20000\pi$ рад/с), так и вдали от нее. Электрические выводы всех преобразователей включены параллельно в разомкнутую электрическую цепь (режим холостого хода).

В качестве оцениваемых физических характеристик были выбраны давление в поле рассеянной волны в дальней зоне системы $p_D^{(0)}$ и на поверхности $p_k^{(0)}$ преобразователей (акустическое поле), радиальные перемещения поверхностей преобразователей $W^{(k)}$ (механическое поле), а также электрические напряжения на выходе системы параллельно соединенных преобразователей V и отдельных преобразователей $V^{(k)}$ (электрическое поле). Все эти характеристики оценивались в зависимости от направления прихода плоских волн. При расчете количество гармоник в окружном направлении, аппроксимирующих формы колебаний цилиндров, выбиралось равным 50. При этом обеспечивалась точность вычисления указанных физических характеристик порядка 1 % от их максимальных значений.

В результате численного моделирования получен обширный расчетный материал и проведен его систематический анализ. Наиболее интересные результаты представлены ниже. На всех графиках обозначения без штриха соответствуют частоте падающей волны $\omega=20000\pi$ рад/с, а со штрихом – $\omega=8000\pi$ рад/с. Для того, чтобы выявить влияние взаимодействия по звуковому полю в антеннах на параметры преобразователей, акустическое давление и радиальные перемещения преобразователей в составе систем сравниваются с аналогичными характеристиками одиночного преобразователя.

3.1. Результаты расчета акустических полей

Прежде всего отметим, что образование из отдельных электроупругих цилиндров системы дифрагирующих тел сопровождается как изменением волновых размеров препятствия, рассеивающего падающие на него плоские волны, так и появлением эффекта взаимодействия между полями отдельных элементов системы. При малых волновых размерах преобразователей и системы в целом при изменении углов прихода плоских волн диаграммы рассеяния практически не изменяются. С увеличением отношения ω/ω_0 , где ω_0 – собственная частота пульсирующих колебаний электроупругой оболочки в воздухе, характер углового распреде-

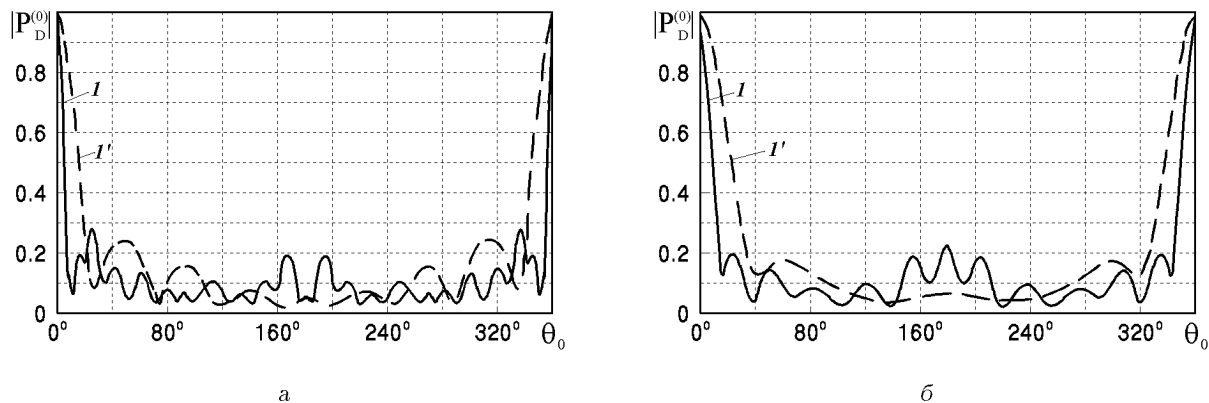


Рис. 2. Нормированные амплитудные диаграммы рассеяния решеток преобразователей на частотах $\omega = 20000\pi$ рад/с и $\omega = 8000\pi$ рад/с для угла падения плоской волны $\alpha = 0^\circ$:
а - круговая система преобразователей, б - дуговая система преобразователей

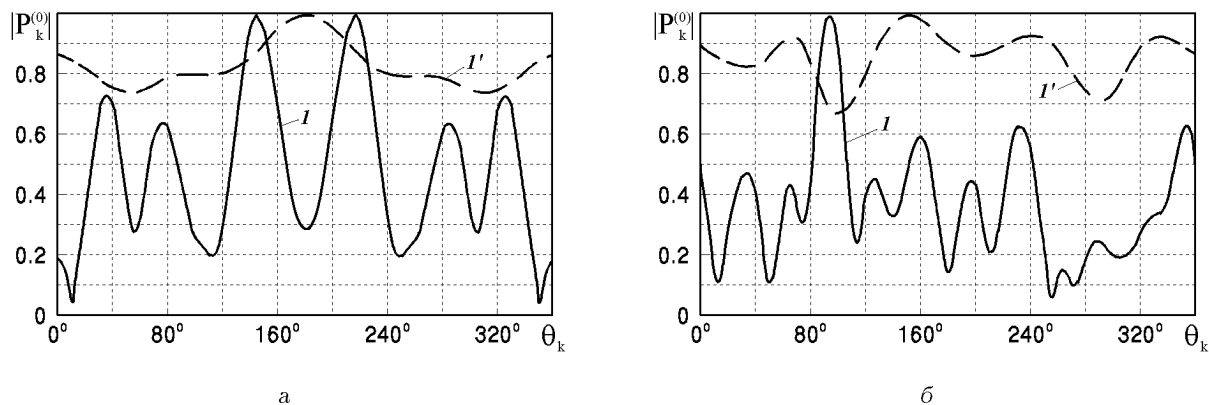


Рис. 3. Угловые зависимости нормализованных модулей акустических давлений на поверхности преобразователя с номером $k = 3$ на частотах $\omega = 20000\pi$ рад/с и $\omega = 8000\pi$ рад/с для угла прихода плоских акустических волн на решетку $\alpha = 0^\circ$:
а - круговая система преобразователей, б - дуговая система преобразователей

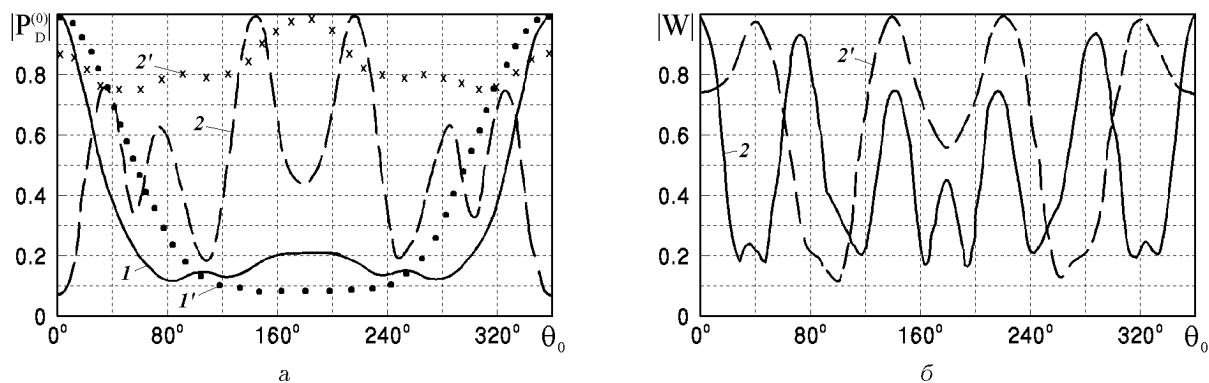


Рис. 4. Угловые зависимости нормализованных модулей амплитуд акустических давлений (а) в дальнем поле (I, I') и на поверхности преобразователя ($2, 2'$) и модулей радиальных перемещений (б) поверхности преобразователя ($2, 2'$) для одиночного преобразователя в безграничной среде при угле прихода плоской акустической волны $\alpha = 0^\circ$

ления амплитуды рассеянного поля начинает видоизменяться с изменением направления прихода плоских волн. Увеличение волновых размеров рассеивающего препятствия приводит к обострению диаграмм рассеяния и уменьшению бокового рассеяния (рис. 2). При этом как в случае круговой решетки оболочек, так и в случае дуговой решетки рассеянное поле характеризуется образованием основного лепестка рассеяния по направлению падения плоских волн, и преимущественно одно-сторонним характером рассеяния.

Для обоих рассмотренных случаев наблюдается естественное увеличение изрезанности диаграммы рассеяния с ростом частоты. Однако в целом уровень тыльного излучения (т. е. излучения в направлении падающей волны) остается низким. И хотя, как видно из данных рис. 2, с ростом частоты наблюдается рост излучения в направлении прихода волны, в целом он весьма незначителен. В случае рассеяния на единичном жестком цилиндре в диаграмме рассеяния наблюдается высокий уровень тыльного лепестка. Эти различия обусловлены совокупностью факторов, включающей упругость элементов решетки и влиянием акустического взаимодействия между элементами.

Изменение конфигурации рассеивающего препятствия от круговой к дуговой решетке преобразователей сопровождается изменением диаграмм рассеяния. Однако свойство одностороннего характера рассеяния сохраняется для всех решеток. Различия наблюдаются только в структуре бокового поля. Качественное объяснение этих различий может быть связано с различиями в геометрии рассеивателей. В случае круговой решетки пространство между рассеивателями образует почти замкнутую полость, которая, возбуждаясь рассеянными волнами, сама становится источником звуковых волн. Эти волны через щели между преобразователями излучаются в окружающую среду, участвуя наравне с преобразователями решетки в формировании ее диаграммы рассеяния.

Как уже отмечалось, в формировании акустического поля, рассеянного системой электроупругих оболочек, значительную роль играет взаимодействие полей, рассеянных отдельными оболочками в составе системы. Наличие такого взаимодействия приводит к тому, что распределение давления на поверхности цилиндра в составе системы (рис. 3) существенно отличается от распределения давления на одиночном цилиндрическом рассеивателе (кривые 2 и 2' на рис. 4, а). Степень отличия определяется количеством оболочек в составе системы, местоположением отдельной оболочки по отношению к другим, размерами оболочек и си-

стемы, частотой падающей волны и направлением ее прихода.

В области относительно низких частот ($kR \approx 1.1$, $kL \approx 5.5$) амплитуды давления в поле рассеяния, определенные на поверхности оболочек, обладают слабо выраженной неоднородностью. При этом в круговых системах различие в полях рассеяния отдельных оболочек как между собой, так и для различных значений углов α значительно меньше, чем в дуговых. С увеличением частоты падающей волны неоднородность углового распределения амплитуд давления рассеянного поля возрастает как для одиночной оболочки (рис. 4, а), так и для оболочек, работающих в составе системы (рис. 3).

На частоте резонанса пульсирующих колебаний оболочки $\omega = \omega_0$ ($kR \approx 2.8$, $kL \approx 14$) в направлении падения плоской волны образуется существенный провал в угловом распределении амплитуд давления на поверхности цилиндров. В целом распределение давления для этой относительно высокой частоты характеризуется значительной неравномерностью рассеянного поля. Эти провалы резко увеличивают неоднородность распределения амплитуд давления на поверхности оболочек. Для круговой системы оболочек поля рассеяния одиночной оболочки и выделенной оболочки с номером 3 в составе системы мало отличаются между собой (см. кривые 1 на рис. 3, а и 2 на рис. 4, а). Распределение давления на оболочке с тем же номером в дуговой решетке существенно изменено влиянием несимметричных составляющих (кривая 1 на рис. 3, б).

3.2. Результаты расчета механических полей

Рассмотрим теперь, какие перемещения испытывают поверхности оболочек при возбуждении их падающими плоскими волнами. Соответствующие расчетные данные для нормализованных модулей нормальных к поверхности оболочек компонент перемещений в рассматриваемых решетках представлены на рис. 5. Анализ кривых свидетельствует о значительной изменяемости по окружной координате указанной кинематической характеристики. И обусловлено это прежде всего тем, что перемещения точек поверхностей оболочек представляют собой суперпозицию перемещений двух типов – упругих перемещений поверхностей оболочек и поступательных перемещений оболочек в целом как “твердых тел”.

Упругие перемещения поверхностей оболочек являются результатом суперпозиции радиальных и изгибных мод колебаний, причиной возбуждения

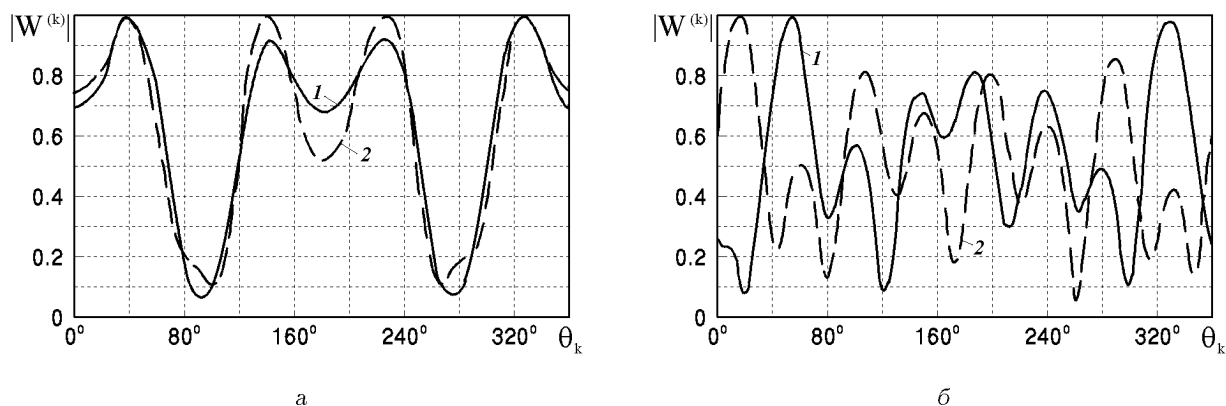


Рис. 5. Угловые зависимости нормализованных модулей перемещений поверхностей преобразователей с номерами $k=1$ и 3 на частоте $\omega=8000\pi$ рад/с для угла прихода плоских акустических волн на решетку $\alpha=0^\circ$:

а – круговая система преобразователей, б – дуговая система преобразователей,
 $1 - k=1$, $1 - k=3$

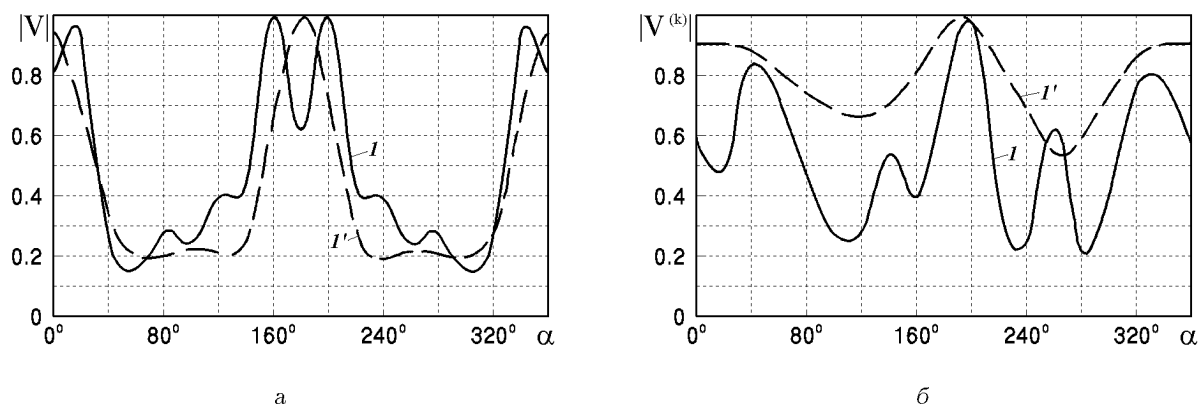


Рис. 6. Зависимости нормализованных электрических напряжений для круговой решетки на выходе решетки (а) и для преобразователя с номером $k=2$ (б) на частотах $\omega=20000\pi$ рад/с и $\omega=8000\pi$ рад/с от угла прихода плоских акустических волн на решетку

которых служит возникновение сложного силового поля (рис. 3) при дифракции плоских звуковых волн. Естественно, что вклад первых мод колебаний в ряде случаев является определяющим. Так, в области низких частот ($kR \approx 1.1$, $kL \approx 5.5$) для оболочек в составе круговых систем (рис. 5, а) при падении волн вдоль оси симметрии (оси Ox) преобладающими являются осциллирующие колебания, о чем свидетельствуют появление максимальных амплитуд перемещений вдоль направления падения волны и близкие к нулю перемещения в направлениях, нормальных к направлению падения волны. При этом перемещения различных оболочек круговой системы незначительно отличаются как между собой, так и от перемещений одиночной оболочки W (рис. 4, б). Переход к дуговой решетке

оболочек (рис. 5, б) значительно усложняет картину колебаний каждой оболочки, поскольку в силу достаточно сильного взаимодействия оболочек в составе системы кроме составляющей осцилляций оболочек вдоль оси Ox возникает и вторая составляющая осцилляций вдоль оси Oy и обе составляющие сравнимы по величине. Хотя, как видно по кривой 1 на рис. 5, б, осциллирующая компонента движения является довольно существенной. Увеличение частоты падающей волны сопровождается дальнейшим усложнением картины перемещений оболочек, что проявляется в увеличении количества пиков максимальных перемещений. При этом для круговой ($kR \approx 1.1$, $kL \approx 5.5$) решетки при падении волны вдоль оси Ox перемещения противоположных точек первой и третьей оболочек ока-

зываются наиболее различающимися.

3.3. Результаты расчета электрических полей

Рассмотрим теперь зависимости напряжений на выходе как систем приемных преобразователей, так и одиночных преобразователей в составе систем от углов падения плоских волн. Отметим, что эти зависимости представляют собой не что иное как диаграммы направленности систем преобразователей или одиночных преобразователей в составе систем в режиме приема.

Круговая решетка цилиндрических преобразователей из-за симметрии не имеет единого направления наибольшей чувствительности. Однако в силу достаточно больших расстояний между элементами решетки ее диаграммы направленности характеризуются значительной неравномерностью как на частоте пульсирующих колебаний приемных преобразователей, так и вдали от нее (рис. 6, а).

Переход от круговой к дуговой решетке (рис. 6, б) существенно изменяет направленные свойства системы преобразователей. На низких частотах ($kR \approx 1.1$, $kL \approx 5.5$, кривая 1') дуговая решетка преобразователей формирует двухлепестковую диаграмму направленности с практически одинаковыми по уровню и отличающимися по ширине на уровне 0.707 основными лепестками. Последнее обусловлено различием влияния кривизны дуги на формируемое поле по обе стороны от дуговой решетки. Если выпуклость дуги приводит к расфазировке полей отдельных приемников и, как следствие, к расширению основного лепестка диаграммы направленности дуговой решетки со стороны выпуклости дуги, то вогнутость ее обуславливает определенную фокусировку дуги, что приводит к некоторому обострению основного лепестка диаграммы направленности. С увеличением частоты возрастает влияние вторичных волн, многократно отраженных преобразователями рассматриваемых систем, на формирование волновых полей систем и, как следствие, наблюдается как расширение основного лепестка, так и увеличение его изрезанности.

Из физических соображений ясно, что электрическое напряжение на выходе одиночного пульсирующего приемного преобразователя не зависит от угла прихода плоских волн. Анализ кривых рис. 6, б позволяет установить, насколько нарушается эта закономерность вследствие взаимодействия преобразователей в составе системы.

При размещении преобразователей в составе круговой системы в области низких частот

($kR \approx 1.1$, $kL \approx 5.5$) взаимодействие преобразователей приводит к возникновению слабо выраженной (в пределах 3 дБ) неоднородности в угловой зависимости электрического напряжения на выходе каждого преобразователя. С увеличением частоты падающей плоской волны изрезанность угловой зависимости электрического напряжения возрастает. Тильная зона каждого преобразователя расположена со стороны внутренней области круговой системы преобразователей.

Переход от круговой системы преобразователей к дуговой сопровождается, прежде всего, нарушением симметрии диаграммы направленности каждого преобразователя относительно линии OO_i , соединяющей центр преобразователя O_i с центром системы O (см. рис. 1), и различием диаграмм направленности преобразователей, зависящим от их места расположения в системе. В области низких частот угловая зависимость напряжения на выходе преобразователя при работе его в составе системы приобретает некоторую направленность, более высокую для преобразователей, расположенных ближе к центру системы. С увеличением частоты приходящей плоской волны направленные свойства преобразователей в составе дуговой системы обостряются, а крайние преобразователи системы приобретают даже ярко выраженное свойство однонаправленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление физических характеристик различных полей, возникающих при взаимодействии плоской акустической волны с цилиндрическими решетками двух типов, состоящими из цилиндрических пьезокерамических преобразователей, и отдельным преобразователем при работе его вне решеток, показывает, что взаимодействие преобразователей в системах с конечным числом преобразователей обуславливает:

- потерю однородности угловой зависимости акустических, механических и электрических полей преобразователей;
- потерю симметрии угловой зависимости акустических, механических и электрических полей преобразователей в составе дуговых систем;
- приобретение направленных свойств преобразователями в составе систем;
- приобретение свойства однонаправленности всеми преобразователями в составе круговых

систем и нецентральными преобразователями в составе дуговых систем.

В количественном выражении степень влияния взаимодействия на перечисленные характеристики зависит от конфигурации криволинейных решеток, количества преобразователей в них и волнового расстояния между преобразователями, соотношения между частотой возбуждающей плоской волны и собственной резонансной частотой нулевой моды колебаний преобразователей в воздухе.

Установлена существенная роль внутренней области круговых решеток на формирование диаграмм рассеяния решеток.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают признательность академику В. Т. Гринченко за полезные советы, в значительной мере углубившие физическое понимание полученных расчетных результатов.

1. *Смарышев М. Д.* Направленность гидроакустических антенн. – Л.: Судостроение, 1973. – 277 с.
2. *Иванов Е. А.* Дифракция электромагнитных волн на двух телах. – Минск: Наука и техника, 1968. – 584 с.
3. *Twersky V.* Multiple scattering of waves and optical phenomena // *J. Opt. Soc. Amer.* – 1952. – **52**, N 2. – P. 145–171.
4. *Huang X. Y.* Effect of multiple scattering of sound waves on motion of parallel cylindrical shells // *J. Sound Vib.* – 1994. – **178**, N 3. – P. 349–359.
5. *Свищев Ю. В.* Решение задачи дифракции акустических волн на системе мягких незамкнутых экранов, произвольно расположенных в пространстве // *Доповіді НАН України.* – 1999. – N 10. – С. 88–91.
6. *Лейко А. Г., Савин В. Г., Ткаченко В. П.* Взаимодействие плоской акустической волны с цилиндрической решеткой, состоящей из пьезокерамических цилиндрических преобразователей // *Акуст. вісн.* – 1999. – **2**, N 2. – С. 69–76.
7. *Бабаев А. Э., Савина И. В.* Дифракция акустических волн на параллельно расположенных цилиндрических пьезокерамических системах коаксиальных оболочек, заполненных вязкой жидкостью // *Прикл. мех.* – 1993. – **29**, N 6. – С. 45–52.
8. *Басовский В. Г.* Излучение звука конечной решеткой из открытых пьезокерамических колец // *Акуст. вісн.* – 1998. – **1**, N 2. – С. 3–20.
9. *Коржик А. В., Лейко А. Г.* Метод “сквозной” задачи и его приложение к определению напряжения на выходе антенной решетки при наклонном падении плоской звуковой волны // *Судостр. промышл. Сер.: Акустика.* – 1991. – Вып. 9. – С. 21–27.
10. *Мацыпура В. Т.* Излучение звука набором цилиндрических пьезокерамических излучателей // *Акуст. вісн.* – 1998. – **1**, N 1. – С. 58–64.
11. *Вовк И. В., Гринченко В. Т.* Излучение звука набором цилиндрических пьезокерамических излучателей // *Акуст. ж.* – 1991. – **37**. – С. 259–269.
12. *Бабаев А. Э., Савин В. Г., Лейко А. А.* Нестационарные режимы излучения системы двух многомодовых цилиндрических пьезопреобразователей // *Акуст. ж.* – 1995. – **41**. – С. 554–558.
13. *Бабаев А. Э., Савин В. Г., Рябуха Ю. Н.* Взаимодействие плоской нестационарной волны с системой двух цилиндрических электроупругих оболочек // *Прикл. мех.* – 1995. – **31**, N 1. – С. 50–58.
14. *Бабаев А. Э., Савин В. Г., Лейко А. А.* Излучение нестационарных акустических волн системой двух однонаправленных цилиндрических пьезопреобразователей // *МТТ.* – 1996. – N 2. – С. 182–190.
15. *Пьезокерамические преобразователи.* Справочник / Ред. С. И. Пугачева. – Л.: Судостроение, 1984. – 256 с.
16. *Гринченко В. Т., Улитко А. Ф., Шульга А. Н.* Электроупругость / *Механика связанных полей в элементах конструкций (в 5-ти томах).* – Т. 5. – К.: Наук. думка, 1989. – 280 с.
17. *Шендеров Е. Л.* Волновые задачи гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1972. – 348 с.