

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ГИДРОМЕХАНИКИ

На правах рукописи

КОРЖИК АЛЕКСЕЯ ВЛАДИМИРОВИЧ

УДК 634.3

ПРИЕМ И ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН  
ПЛОСКИМИ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ  
ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

01.04.06 - Акустика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Киев 1993

AB 28.671

Работа выполнена в Научно-производственном объединении

"Славутич"

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор,

ЛЕЙКО А. Г.

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук,

старший научный сотрудник

ВОБК И. В.

- кандидат физико-математических наук,

СЕНЧЕНКО И. В.

Ведущая организация - Институт механики АН Украины

Защита состоится "24" августа 1994 г. в "10" часов  
на заседании специализированного совета Д 01.04.01 Института  
гидромеханики АН Украины / 2520576 Киев, ул. Деябова, 8/4

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке  
института гидромеханики АН Украины

Автореферат разослан "24" августа 1993 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
доктор технических наук

КРИЛЬ С. И.

ЛНБ України ім. В. Стефаніка  
00802290 (L)

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В развитии подходов к изучению вопросов приема и излучения звука антенными решетками можно условно выделить три этапа, связанных с усложнением математических моделей в обеспечение приближения к реальным ситуациям работы антенн.

Первый этап состоял в выборе в качестве модели реального преобразователя решетки - точечного приемника (излучателя). Пространственные характеристики решеток для такой модели глубоко и всесторонне исследованы. Основным недостатком в этом случае является ограниченность использования модели в части реального учета соотношения волновых размеров элемента и рабочей частоты, при этом обязательным является задание колебательных скоростей элементов решетки, что, в силу их точечности, исключает учет и влияние форм и размеров преобразователей на формируемые поля, внося тем самым ошибку в получаемые результаты.

Развитие модельных представлений на втором этапе привело к выбору элемента решетки - как тела определенной формы и размера. Это дало возможность учета взаимосвязи элементов решетки по акустическому полю. Обязательным, по-прежнему, оставалось использование сведений о распределении по поверхностям элементов решетки априори заданных величин и зависимостей колебательных скоростей.

Общим для указанных этапов является искусственное разбиение задач приема и излучения звука на задачи формирования поля в пространстве и задачи преобразования одного вида энергии в другой с последующим обобщением полученных пространственно-энергетических характеристик для единой электро-механической колебательной системы. Существенным недостатком указанных подходов является невозможность учета реального распределения колебательных скоростей по поверхностям преобразователей во взаимосвязи с условиями электрического нагружения, физическими свойствами преобразователей и взаимодействием всех полей, участвующих в процессе преобразования энергии.

Исследование поведения элементов и решеток в целом, с учетом особенностей взаимодействия акустических, механических и электрических полей представляют собой третий этап в развитии модельных представлений антенных решеток и составляют новый класс задач - задач "сквозного" типа, суть которых состоит в том, что на напряжении на выходе генератора ставится в соответствие давление в акусти-

ческом поле (режим излучения) или же давлению в поле падающей волны - напряжение на нагрузках преобразователей решетки (режим приема). Анализ литературы показывает, что основой для развития этого этапа послужили результаты исследований, отраженные в работах А. Ф. Улитко, В. Т. Гринченко, Н. Гуая, В. Д. Кубенко, И. Т. Селезова, И. В. Вовка, А. Г. Лейко, И. А. Шульги, И. В. Сенченко и др.

При решении таких задач возникает возможность учета сложного характера взаимосвязи элементов решетки по указанным полям в совокупности с особенностями электродирования и электрического нагружения преобразователей, и выработки на этой основе рекомендаций по рациональному проектированию антенных решеток.

Цель работы. Целью работы является исследование основных характеристик акустических, механических и электрических полей, участвующих в процессах преобразования энергии и формирования ее в пространстве с учетом многосвязности, для режимов приема и излучения звуковых волн плоскими антенными решетками, состоящими из конечного числа пьезокерамических цилиндрических преобразователей при различных видах электродирования и различных величинах электрических нагрузок преобразователей решетки.

Лучная новизна. На основе использования дифференциальных уравнений колебаний тонких электроупругих оболочек и волнового уравнения для идеальной малосжимаемой жидкости, методом разделения переменных решены "сквозные" задачи о приеме и излучении звуковых волн плоскими антенными решетками, состоящими из круговых цилиндрических преобразователей.

Для режима излучения исследованы закономерности формирования механических и акустических полей антенных решеток, состоящих из преобразователей с полностью электродированными поверхностями.

Для режима приема исследованы закономерности формирования механических, акустических и электрических полей антенных решеток, состоящих из преобразователей с различными видами электродирования.

На основании сопоставления экспериментальных и теоретических результатов подтверждена возможность использования выбранной математической модели при описании процессов приема и излучения звуковых волн рассмотренными антенными решетками.

На защиту выносятся :

1. Аналитические выражения, полученные при решении задач о приеме и излучении звуковых волн плоскими антенными решетками,

образованными из конечного числа пьезокерамических, цилиндрических преобразователей с различными видами электродирования, нагруженных на реальные электрические нагрузки.

2. Результаты численных исследований и установленные при этом количественные связи между характеристиками акустических, механических и электрических полей и параметрами решеток и преобразователей в режимах приема и излучения звука.

3. Рекомендации по практическому использованию полученных результатов при проектировании приемно-излучающих антенных решеток.

Достоверность полученных результатов подтверждается :

1) использованием классических моделей и строгих математических постановок;

2) использованием условий сопряжения вместо граничных условий на поверхностях оболочек системы;

3) контролем сходимости вычислительного процесса в части сходимости рядов, по которым разлагаются рассматриваемые поля, и сходимостью метода, используемого для решения систем бесконечных линейных алгебраических уравнений;

4) экспериментальным подтверждением полученных результатов.

Практическая ценность работы заключается в том, что ее результаты позволяют более полно учесть реальные электрофизические и конструктивные особенности построения приемных и излучающих антенн при выполнении проектных работ.

Исследования проведены в соответствии с планами научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполняемых в НПО "Славутич". Ряд результатов внедрен в виде расчетных методик и технических решений.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на :

- X Всесоюзной конференции по информационной акустике ИНАК-10 (Москва, 1990 г.);

- XI Всесоюзной акустической конференции (Москва, 1991 г.);

- III Всесоюзном семинаре "МАПР-3" (Минск, 1991 г.)

Диссертационная работа в целом обсуждалась на :

- республиканском семинаре "Акустика, механика жидкости, газа и плазмы" в Институте гидромеханики АН Украины (руководитель - чл.-корр. АН Украины, проф. Гринченко В. Т., Киев, 1993 г.);

- семинаре отдела теории колебаний в Институте механики АН Ук-

раины (руководитель - чл.-корр. АН Украины, проф. Кубенко В. Д., Киев, 1993).

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, изложенных на 121 странице машинописного текста, 67 страниц графического материала, библиография включает 115 источников.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность вопросов, составляющих предмет исследований, дан обзор работ, касающихся темы диссертации, сформулирована цель работы и изложен круг вопросов, выносящихся на защиту.

В первой главе рассматривается постановка и решение задач о приеме и излучении звука системой из конечного числа преобразователей (рис. 1), каждый из которых представляет собой бесконечно длинную пьезокерамическую тонкостенную радиально поляризованную круговую цилиндрическую оболочку произвольного радиуса, выполненную из пьезоматериала со скоростью звука  $c_n$  и плотностью  $\rho_n$ . Оболочки помещены в идеальную малосжимаемую жидкость (внутри оболочек - вакуум). Внутренние и внешние поверхности оболочек электродированы и электрически замкнуты на некоторое сопротивление (режим приема) или подключены к выходу генератора (режим излучения).

Предполагается, что в рабочей среде распространяются звуковые волны, описываемые уравнением Гельмгольца для волнового потенциала

$$\Delta \Phi + k^2 \Phi = 0, \quad k = \omega / c.$$

Для описания колебаний оболочек используются уравнения состояния для пьезокерамики, уравнения движения оболочек (записанные с использованием гипотез Кирхгофа-Лява) и уравнения электростатики.

На поверхности оболочек, контактирующих с рабочей средой выполняется условие равенства нормальных составляющих скоростей частиц среды и скоростей смещения по нормали точек поверхностей оболочек

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = - \frac{\partial W}{\partial t}.$$

Граничные условия задач включают в себя электрические граничные условия и условие излучения на бесконечности.

В режиме излучения рассмотрено полное электродирование

(сплошные электроды), а в режиме приема — как сплошные, так и разрезанные электроды (рис. 2).

Вопрос использования разрезных электродов рассматривается при следующих допущениях:

- в виду сплошности, оболочка не может быть представлена как составное тело;

- предполагается, что электроды электрически разделены бесконечно тонкой линией, не влияющей на электромеханические характеристики колебательной системы, и не требующей введения дополнительных условий сопряжения для элементарных неэлектропроводящих участков;

- общее значение результирующих напряжений, в виду линейности задачи, может быть представлено суперпозицией напряжений, развиваемых на соответствующих нагрузках электродов, с определенными весами (например "1" и "0").

В решении рассматриваемых задач излучения и приема звука исходными уравнениями являются:

- уравнения движения пьезокерамических оболочек вращения

$$\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} - \frac{\partial U}{\partial y} + \beta^2 \left[ \rho \left( \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) \right] = \frac{z_0^2}{c^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial U}{\partial y} - W - \beta^2 \left[ \rho \left( \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) \right] = \frac{z_0^2}{c^2} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} - 2z_0(1-\nu)E_0^0 - \frac{z_0^2(1-\nu)z_0}{h_0} \rho_2$$

где  $\beta^2 = h_s / 12$ ,  $h_s$  - толщина оболочки;  $\nu$  - коэффициент Пуассона;

$\epsilon_{33}^0$  - диэлектрическая проницаемость;  $J_{31}$  - пьезомодуль;

$\beta_p = \frac{1 + \kappa_p^2(1+\nu)}{2(1-\kappa_p^2)}$  - коэффициент электромеханической связи;

а нормальные  $W$  и тангенциальные  $U$  составляющие перемещений точек поверхности оболочек могут быть представлены в виде рядов Фурье

$$W = \sum_{-\infty}^{\infty} W_n e^{in\varphi_s}, \quad U = \sum_{-\infty}^{\infty} U_n e^{in\varphi_s}, \quad \varphi_s \in [0; 2\pi]$$

- уравнения для акустического поля:

$$A_2 = \sum_{s=1}^N P_s^{(1)} \quad \text{для режима излучения;}$$

$$A_2 = \rho^{(0)} + \sum P_s^{(0)} \quad \text{для режима приема,}$$

где

$$P_s^{(0)} = P_s^{(0)}(z_s, \varphi_s) = \sum_n A_n^{(0)} J_n(\kappa z_s) e^{in\varphi_s}$$

$$P_s^{(1)} = P_s^{(1)}(z_s, \varphi_s) = e^{i\kappa(h_s - z_s)} \sum_n i^n J_n(\kappa z_s) e^{-in\varphi_s} e^{i\kappa z_s}$$

$H_n^{(2)}(kz)$  - функция Ханкеля;  $J_n(kz)$  - функция Бесселя.

Использование граничных условий по электрическому полю в режиме излучения сводится к заданию значения выходного значения напряжения генератора в виде

$$U_r = E_z^{(0)} e^{j\omega t}$$

с точностью до  $k_3$ , при синфазном возбуждении оболочек.

Для режима приема, напряжение (напряженность) на нагрузке преобразователя (электрода) определяется с помощью соотношений

$$\int_S \dot{D}_n dS = \frac{U_n}{Z_n}, \quad U_n = \int_{-h/2}^{h/2} E_z^{(0)} dh,$$

где  $U_n$  - напряжение, развиваемое на нагрузке преобразователя;  
 $Z_n$  - электрическая нагрузка преобразователя;

$$D_n = \epsilon_{33}^T (1 - \kappa_1^2) E_z^{(0)} + \frac{d_{31}}{s_{11}^T (1 - \nu)} \frac{1}{z_{01}} \left[ \frac{\partial U}{\partial y} - W \right] - \text{нормальная составляющая электрической индукции};$$

Отметим, что значения напряжений на нагрузках разрезных электродов представляются суперпозицией

$$U_n = U_1 f_1(\psi_0) + U_2 f_2(\psi_0),$$

где  $f_1(\psi_0)$  и  $f_2(\psi_0)$  - функции включения с весами "1" и "0" в пределах раскрыва электродов  $\gamma_{01}$  и  $\gamma_{02}$  на интервале  $\psi_0 \in [0; 2\pi]$ .

Решение для режимов приема и излучения проводилось методом разделения переменных с использованием теоремы сложения для волновых цилиндрических функций и свойств полноты и ортогональности функций вида на интервале  $[0; 2\pi]$ . С учетом удовлетворения условий сопряжения на поверхности оболочек и электрических граничных условий задача сводится к решению систем бесконечных линейных алгебраических уравнений вида

$$X_n^{(s)} + \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^{\infty} C_{nm}^{(s)} X_m^{(s)} = D_n^{(s)}, \quad n \in J = -\infty; \infty \mathbb{Z}, \\ m \in J = -\infty; \infty \mathbb{Z},$$

которые в использованном для решения классе волновых функций являются квазирегулярными и могут быть разрешены относительно неизвестных коэффициентов методом редукции.

Результатирующими системами являются:

Для режима излучения

$$\begin{cases} \epsilon_{33}^{(0)} W_e^{(0)} - z_{01} (1 - \nu) d_{31} E_{z, n, e}^{(0)} = - \frac{z_{01}^2 (1 - \nu^2)}{k_{33}} z_{03} P_z \\ \left\{ W_e^{(e)} + \frac{1}{\omega \rho c} \left[ A_e^{(0)} H_e^{(0)}(kz) + \sum_{j=1}^N A_p^{(j)} J_p^{(j)}(kz) \right] H_p^{(1)}(kz) e^{i(p - e) \psi_0} \right\} \end{cases}$$

$$p \in J = -\infty; \infty \mathbb{Z}, \quad e \in J = -\infty; \infty \mathbb{Z};$$

где  $P_z = A_e H_e^{(0)}(kz_{0z}) + \sum_{j=1}^N \sum_p A_p \psi J_e(kz_{0z}) H_p^{(0)}(kz_{js}) e^{i(p-e)\varphi_{js}}$

Для режима приема (общий случай)

$$\begin{cases} A_e H_e^{(0)} - \sum_{j=1}^N \sum_p (1-V) \psi_n W_n E_{zen} = - \frac{S_n(1-V^2)}{k \cos} z_{0z} P_z \\ W_e^{(0)} = \frac{1}{\omega \rho c} [e^{ik(\vec{n} \cdot \vec{R}_{0z})} i J_e(kz_{0z}) e^{-ind} + A_e H_e^{(0)}(kz_{0z}) + \sum_{j=1}^N \sum_p A_p \psi J_e(kz_{0z}) \times \\ \times H_p^{(0)}(kz_{js}) e^{i(p-e)\varphi_{js}}] \end{cases}$$

где  $P_x = e^{ik(\vec{n} \cdot \vec{R}_{0z})} i J_e(kz_{0z}) e^{-ind} + A_e H_e^{(0)}(kz_{0z}) + \sum_{j=1}^N \sum_p A_p \psi J_e(kz_{0z}) H_p^{(0)}(kz_{js}) e^{i(p-e)\varphi_{js}}$

$$\begin{aligned} E_{zen} &= - \frac{A_i \omega d z_1}{(A_i \omega \varepsilon_2 (1-k^2) z_{0z}^2 \gamma_{0z} - k z_1 \varepsilon_1^2 S_n^2 (1-V))} (i n B_n - 1) z_{0z} \frac{\sin n \delta_{0z}}{n \gamma_{0z}} \cdot f_1(\varphi_2) - \\ &- \frac{A_i \omega d z_1}{(A_i \omega \varepsilon_2 (1-k^2) z_{0z}^2 \gamma_{0z}^2 - k z_1 z_2 \varepsilon_2^2 S_n^2 (1-V))} (i n B_n - 1) z_{0z} \frac{\sin n \delta_{0z}'}{n \gamma_{0z}'} \cdot f_2(\varphi_2) \end{aligned}$$

Анализ опыта расчетных работ показывает, что при решении подобных систем в качестве количества членов, учитываемых в разложении полей, и порядка усечения бесконечных систем может быть принято значение  $N/1 = [2ka] + \beta$ , где  $k = \omega/c$ ,  $2a$  - диаметр окружности, описываемой вокруг излучающего (дифрагирующего) преобразователя,  $\beta = 4 - 9$  (ближее поле) или же  $\beta = 9 - 15$  (дальнее поле). При принятии величины  $\beta = 10$  и выбранных дистанций  $z \approx a$  и  $z \approx 100a$ , получаемый порядок усечения позволяет получить точность вычисления не хуже 3%.

Таким образом, решение бесконечных систем относительно неизвестных коэффициентов, дает возможность определить значения полей в любой точке пространства.

Во второй главе в режиме излучения исследуются акустические и механические поля антенных решеток при синфазном электрическом возбуждении полностью элетродированных преобразователей.

Для выбранных относительных толщин оболочек, путем решения характеристического уравнения

$$F_n = \frac{\Omega^4 - (n^2 + 1)(1 + \beta^2 \beta^2 \gamma_p) \Omega^2 + n^2 \beta^2 \gamma_p (n^2 - 1)}{\Omega^2 - n^2 (1 + \beta^2 \beta^2 \gamma_p)}$$

определены корни  $(\Omega_n^{(1)})^2$  и  $(\Omega_n^{(2)})^2$

$$(\Omega_n^{(1)})^2 = \frac{1}{2} (n^2 + 1) (1 + \beta^2 n^2) \left[ 1 - \left( 1 - \frac{4 \beta^2 n^2 (n^2 - 1)^2}{(n^2 + 1)(1 + \beta^2 n^2)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

$$(\Omega_n^{(2)})^2 = \frac{1}{2} (n^2 + 1) (1 + \beta^2 n^2) \left[ 1 + \left( 1 - \frac{4 \beta^2 n^2 (n^2 - 1)^2}{(n^2 + 1)(1 + \beta^2 n^2)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

При этом показано, что при точных расчетах для  $k_0 a \ll 1$  модовые составляющие с номерами 9, 10 могут иметь резонанс, совпадающий с

ревансом основной моды колебаний оболочки в свободном поле.

Проведены численные исследования характеристик акустических (ближних и дальних) и механических полей системы оболочек. Расчеты здесь и ниже проводились для  $N = 2$  оболочек, выполненных из материала ЦТЭС-3 с параметрами:  $\rho_n = 7300$  кг/м<sup>3</sup>;  $\epsilon_{33}^T = 21.24 \cdot 10^{-10}$  Ф/м;  $d_{31} = -160 \cdot 10^{-12}$  Па;  $c_{44} = 3500$  м/с.;  $2t_{0s} = 135$  мм;  $h_s = 6$  мм.

Численные исследования проведены для диапазона частот  $\Delta f = (0.5 - \sqrt{2})f_0'$  и волновых размеров решетки  $d = 0.8\lambda_0$ ,  $d = 1.6\lambda_0$ . Исследования показали, что в составе решетки акустические и механические поля преобразователей носят многомодовый характер, а одиночный преобразователь при выбранном виде электродривирования и возбуждения характеризуется лишь основной формой колебаний. Отмечено, что в расчетной ситуации в ближнем поле связанность мод высших порядков и основной формы может проявляться для  $n = 4$  в виду соизмеримости амплитудных вкладов пульсирующей моды ( $n = 0$ ) и изгибной ( $n = 4$ ). Эта особенность характерна для волновых размеров решетки  $d \approx 0.8\lambda_0$ . Остальные модовые составляющие имеют тенденцию к спадающему с ростом номера моды  $n$ .

Суммарные пространственные характеристики определяются амплитудно-фазовыми параметрами модовых составляющих полей и различны для ближних и дальних полей в силу перегруппировки амплитудных и фазовых вкладов мод для дальнего поля из-за разного пространственного затухания низших и высших мод. Так, дальнее поле характеризуется связанностью колебаний оболочек, определяемой основной и второй формами ( $n = 0$ ,  $n = 2$ ).

Пространственные характеристики ближних акустических полей в рассматриваемом частотном диапазоне претерпевают изменения, связанные с переориентировкой максимумов между тыльными (обращенными во внутрь системы) и внешними (обращенными наружу) лепестками

Связанность колебаний преобразователей системы на низших и высших формах и ее влияние на формируемые акустические поля может быть проиллюстрирована распределением амплитудных вкладов модовых составляющих нормальной  $W$  и тангенциальной  $U$  составляющих перемещений точек поверхности оболочек. Здесь наблюдается существенное влияние изгибных мод с  $n = 2-3$  ( $W$ ), а также осциллирующих колебаний ( $n = 1$ ) ( $U$ ).

Таким образом, учет влияния сложного характера изгибно-осциллирующих колебаний оболочек на формируемые ближние и дальние поля

в условиях взаимодействия преобразователей по акустическому полю, приводит к тому, что полученные характеристики направленности (рис. 3) являются результатом учета сложного характера перераспределения возмущений по поверхностям взаимодействующих преобразователей и отражает тот факт, что априори заданное распределение колебательных скоростей по поверхностям преобразователей не дает возможности оценить реальное, пространственное распределение звуковой энергии в пространстве.

Характеристики направленности, полученные "сквозным" методом, и традиционными способами (полагается, что колебательная скорость на поверхности - постоянна и не зависит от угла - т.е. колебания оболочек чисто пульсирующие) приведены на рис. 3 и имеют ряд существенных отличий в части переориентировки направления основного излучения и ширины основного лепестка.

В третьей главе в режиме приема при различных углах падения плоской звуковой волны численно исследуются акустические, механические и электрические поля антенных решеток, состоящих из преобразователей с полностью электродированными поверхностями и нагруженных на одинаковые активные электрические нагрузки.

Условие взаимодействия преобразователей по акустическому полю при приводит к определенному амплитудно-фазовому соотношению между модовыми составляющими полей для каждого фиксированного угла падения. В рассматриваемом случае механические поля, в основном, определяются вкладами основной формы и форм  $n \sim 2, 3$ . При изменении угла падения происходит перегруппировка акустического поля и связанного с ним механического, выражающаяся в изменении вкладов основной и высших форм перемещений. Это, в свою очередь, приводит к тому, что для решетки рассмотренных волновых размеров ее ближние и дальние поля переориентируются (по направлению максимумов) и их модовый состав определяется иным распределением амплитудных вкладов мод высшего порядка. Учет влияния высших мод в суммарных пространственных характеристиках ближних полей приводит к изменению положения нулей, росту ореола и отличию (до 3 дБ) в уровне тыльного лепестка по сравнению с характеристиками рассеяния аналогичной по волновым размерам системы абсолютно мягких цилиндров.

Отметим, что при данном виде электродирования электрический сигнал на нагрузке определится лишь нулевой формой связанных колебаний преобразователей, при этом амплитуда и фаза вклада основно...

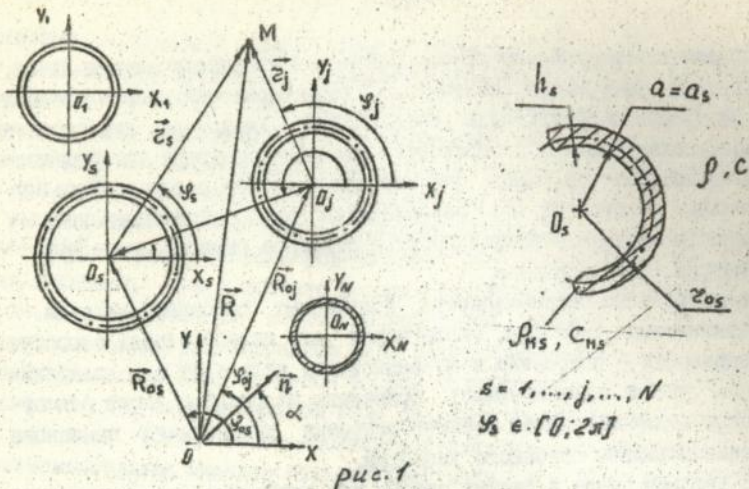


рис. 1

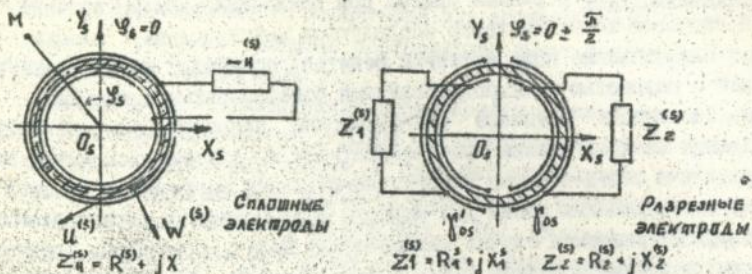


рис. 2



рис. 3

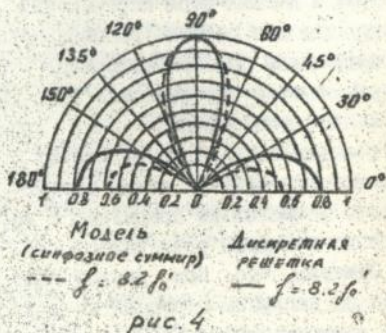


рис. 4

формы (по механической стороне) зависят от угла падения плоской волны и характера связности.

Векторным методом получены возможные характеристики направленности рассматриваемой системы оболочек для "сквозной" задачи в сравнении с характеристиками направленности аналогичных по волновым размерам дискретных решеток, определенных традиционными методами. При этом отличия состоят в уровнях боковых лепестков (до 3-дБ) и ширине основного лепестка (до 2) (рис. 4).

В четвертой главе в режиме приема при различных углах падения плоской звуковой волны исследуются акустические, механические и электрические поля антенных решеток, состоящих из преобразователей, с разрезными электродами, нагруженными на отдельные одинаковые активные электрические нагрузки.

Проведены численные исследования характеристик акустических, механических и электрических полей для волновых размеров  $d \sim 0,8\lambda_0$ ,  $d \sim 1,6\lambda_0$  в диапазоне частот  $\Delta f = 8,2f_0' \div 11,5f_0'$  при различных углах падения плоской звуковой волны и различных величинах электрических нагрузок

Изменение величины электрической нагрузки покатательно с точки зрения перехода из условий холостого хода к короткому замыканию, что приводит к некоторому изменению жесткости преобразователя и рассогласованию электрической цепи. Отмечено, что уменьшение электрической нагрузки в 10 раз, в расчетном случае приводит к уменьшению амплитудных вкладов высших мод до 20 дБ и, следовательно, изменяет условия связности колебаний преобразователей. Это отражается на суммарных пространственных характеристиках акустических и механических полей как для величин относительных максимумов, так и для общего характера углового распределения.

Наряду с особенностями амплитудных вкладов модовых составляющих акустических полей (влияние мод 1, 2, 4, 6) с частотно-зависимым характером связности, отмечена неодинаковость модового состава полей для рассматриваемого вида электродирования и полностью электродированных поверхностей. Амплитуды и фазы электрических сигналов на нагрузках, а также их модовый состав в рассматриваемом случае определяется не только величиной нагрузки, но и углом раскрытия электрода, что обеспечивается разложением в ряд Фурье функций включения  $f_1(\theta)$  и  $f_2(\theta)$  и выполнением закона Ома для участка цепи.

Использование разрезных электродов обогащает модовый состав результирующего сигнала на нагрузках и может быть использовано для выделения полезных особенностей модовой структуры акустических и механических полей, путем выбора угла раскрыва электродов. Положительная особенность использования разрезных электродов иллюстрируется более широкими возможностями (по сравнению с полностью электродированными поверхностями) в части формирования характеристик направленности путем векторного суммирования сигналов на нагрузках с соответствующими фазовыми сдвигами.

Характеристики направленности, сформированные для рассмотренной системы преобразователей по результатам решения "сквозной" задачи, для синфазного суммирования сигналов на нагрузках электродов совпадают с характеристиками направленности решетки, преобразователи которой полностью электродированы и имеют такие же отличия от характеристик направленности решетки-прототипа.

В пятой главе экспериментально подтверждается состоятельность принятых на этапе формулировки модели и решения задач предположений. Проводятся измерения характеристик направленности и угловых распределений ближних полей системы преобразователей и одиночного преобразователя, выполненных на основе цилиндрических пьезоэлементов и удовлетворяющих условиям протяженности ( $4 \sim (3 - 5)\lambda$ ) и тонкостенности ( $h_0 \sim 0.1$ ).

Измерения проводились в измерительном бассейне по типовым схемам и методикам. Для измерений в ближнем поле применялся специальный малогабаритный шуп-гидрофон, закрепленный на координатном приспособлении. Результаты измерений показали, что измеренные пространственные характеристики дальних и ближних полей совпадают с расчетными с точностью гидроакустических измерений.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты работы сводятся к следующему :

Для режима излучения :

1. Сформулирована математическая модель антенной решетки произвольной конфигурации, состоящей из конечного числа круговых цилиндрических пьезокерамических преобразователей с полностью электродированными поверхностями. Методом разделения переменных с использованием гипотез Кирхгофа-Лева, получено общее решение

"сквозной" задачи для режима излучения.

2. Выполнены численные исследования характеристик полей решеток различных волновых размеров при синфазном гармоническом возбуждении преобразователей.

3. Установлено, что выбранный тип электрического возбуждения преобразователей на фиксированных частотах (эквивалентный созданию каждым отдельным преобразователем чисто радиальных возмущений в среде), в силу взаимодействия преобразователей по полю в составе решетки приводит к многомодовости, причем связанность мод - частотно-зависимая и определяется волновыми параметрами решетки.

4. Показано, что в формировании акустических полей решеток существенную роль играют связанные колебания, определяемые не только основной, но и высшими формами. При этом связанность для ближних и дальних полей проявляется неодинаково в силу разного пространственного затухания низших и высших мод.

5. Установлено, что характеристики направленности рассмотренных решеток, определенные "сквозным" методом, вследствие учета взаимодействия полей, отличаются от полученных принятыми ранее подходами, в части уровней основных и боковых лепестков и основного направления излучения.

Для режима приема:

1. Сформулирована математическая модель антенной решетки произвольной конфигурации, состоящей из конечного числа круговых цилиндрических цилиндрических преобразователей со сплошными и разрезными электродами, нагруженными на реальные электрические нагрузки. Методом разделения переменных с использованием гипотез Кирхгофа-Лява, получено общее решение "сквозной" задачи о приеме звуковых волн указанной решеткой.

2. Выполнены численные исследования характеристик полей решеток различных волновых размеров с различными видами электродирования и величинами их электрических нагрузок.

3. Установлено, что электрические сигналы на нагрузочных сопротивлениях каждого преобразователя в случае полного электродирования определяются лишь нулевой модой связанных колебаний, в то время как использование разрезных электродов позволяет получить для одной электромеханической колебательной системы несколько значений электрических сигналов, модовые составы которых определяются как нулевой, так и высшими формами колебаний и зависящих от угла

раскрыва и волновых параметров решетки.

4. Показано, что суммарные и модовые пространственно-энергетические характеристики акустических и механических полей в условиях связанности зависят от вида электродирования.

5. Определено, что пространственно-энергетические характеристики акустических и механических полей решетки зависят от величин нагрузочных сопротивлений преобразователей, как результат реакции единой колебательной системы на изменение ее токового режима при изменении и, как следствие, перераспределение электрических напряжений для плечей контура " $Z_{11} - L_{11}$ ", что в условиях связанности приводит к изменению электромеханических свойств преобразователей.

6. Установлено, что величина сигнала на нагрузке преобразователя зависит не только от величины нагрузочного сопротивления, но и от углового распределения амплитуд и фаз возмущений в пределах раскрыва электрода для каждого из углов падения плоской волны в фиксированной ситуации волновых параметров решетки.

7. Характеристики направленности рассмотренных решеток, определенными "сквозным" методом, отличаются от полученных с использованием традиционных подходов, в части уровня боковых лепестков и ширины основного лепестка.

8. Показано, что использование разрезанных электродов дает возможность формирования для решеток одних и тех же волновых размеров семейства характеристик направленности специальной формы.

9. Экспериментально подтверждено соответствие принятых при построении модели решетки и выполнении расчетов допущений, реальным характеристикам решеток.

Основные результаты работы отражены в следующих публикациях:

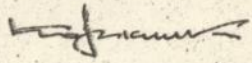
1. Коржик А. В., Стасив П. П. Отклик кругового цилиндрического преобразователя на возбуждение его плоской звуковой волной // Судостроит. промышленность, сер. Акустика, 1991. - Вып. 9. - С. 27-29.

2. 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 // Судостроит. промышленность, сер. Акустика, 1991. - Вып. 9. - С. 21-27.

3. Коржик А. В., Лейко А. Г. Дифракция плоских звуковых волн на

системе из-конечного числа пьезокерамических оболочек//Докл. XI  
Всесою. акуст. конф./Москва, июнь 1991/. -М.: АН СССР АКИН, 1991.  
-С. 131-134.

4. Коржик А. В., Лейко А. Г. Метод "сквозной" задачи и его  
использование с применением ЗЕМ для исследований эффектов взаимо-  
действия механических и электрических полей при возбуждении  
плоскими волнами решеток пьезоприемников// Тезисы докл. III  
Всесою. семинара "МАПР-3" /Минск, сентябрь 1991/. -Минск: АН СССР  
МРТИ, 1991. -С. 30.



Подписано и гечати 22.11.1993 г. Формат 60x84/17  
Бумага офсетная Усл.-печ.лист. 1.0 Уч.-изд.лист. 1.0  
Тираж 100. Заказ 432. Бесплатно

Л. Лиграф, уч-к Института электродинамики АН Укр. науки  
252057, Киев-57, проспект Победы, 56

ЛНБ ім. В. Стефаник  
АН України



463085

AB 28.671

**AB 28.671**