

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ГИДРОМЕХАНИКИ

На правах рукописи

САВИН Эдуард Олегович

УДК 534.3

ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВУКА
КОНЕЧНОЙ СИСТЕМОЙ СОСНЫХ
ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОВОЛОЧЕК

01.04.06 - Акустика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Киев 1993

Работа выполнена в Институте гидромеханики АН Украины

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
ВОВК И.В.

Специальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
ЛЕЙКО А.Г.
- кандидат технических наук
КАРНОВСКИЙ А.М.

Выпускающая организация - Киевский государственный университет
им. Т.Г.Шевченко

Защита состоится " 18 " июня 1993 г. в " ___ " часов
на заседании специализированного совета Д 01.04.01 Института
гидромеханики АН Украины / 252057, Киев, ул. Желябова, 8/4

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Института гидромеханики АН Украины

Автореферат составлен " 17 " мая 1993 г.

Ученый секретарь
ЛННБ им. В. Стефаника
специализированного совета
АН Украины

кандидат технических наук
М.Ю. КОНСТАНТИНОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследование акустического поля, создаваемого цилиндром конечной длины, состоящим из нескольких электроакустических преобразователей, представляет существенный интерес, который обусловлен, с одной стороны, значительной математической и физической содержательностью, а с другой - широким использованием такого источника на практике. В частности, например, при решении большого числа прикладных задач гидроакустики в качестве мощных источников звука используются электроакустические преобразователи цилиндрической формы. Как подтверждает анализ литературы (работы Сапожкова М.А. (1944), Robey D.H. (1955), Williams W., Farke N.G., Morgan D.A. (1964), Вовка И.В., Гринченко В.Т. (1975, 1991), Sandman B.E. (1976), Козырева В.А., Шендерова Е.Л. (1980)), задача об излучении звука таким источником достаточно сложна. Сложность ее определяется, главным образом, наличием двух волновых эффектов - существованием взаимодействия по полю между отдельными электроакустическими преобразователями и дифракцией звука на торцах цилиндра. Получение количественных характеристик полей излучателей такого типа предполагает построение адекватных математических моделей и разработку соответствующих методов решения сформулированных задач математической физики. В указанных выше работах рассматривался идеализированный случай, а именно: одиночный излучатель, на поверхности которого задана колебательная скорость. Совершенно очевидно, что для реальных излучателей, состоящих из ряда элементов (электроакустических преобразователей), из-за указанных выше эффектов возникает ситуация, когда колебательные скорости элементов будут существенно различны. Вопрос учета таких эффектов был рассмотрен в работах Вовка И.В. и Гринченко В.Т. (1991), причем цилиндрический источник моделировался конечным набором электроакустических преобразователей и заданными пслагались параметры электрических источников питания.

Однако приходится констатировать, что в настоящее время работ, посвященных таким исследованиям, весьма мало. Естественно, и объем имеющихся количественных данных, и уровень теоретического осмысле-

ния возможных волновых эффектов не могут в достаточной мере удовлетворять современные потребности практики. Именно эти обстоятельства и стимулировали выполнение настоящей работы.

Цель работы. Целью работы является исследование и установление основных закономерностей излучения звука конечной системой соосных цилиндрических пьезокерамических оболочек, радиальные колебания которых возбуждаются гармоническими электрическими сигналами.

Научная новизна. На основе использования дифференциальных уравнений колебаний тонких пьезоупругих оболочек, волнового уравнения для идеальной сжимаемой жидкости и модифицированного метода частичных областей решена "сквозная" задача об излучении звука цилиндрическим источником конечной длины, элементами которого являются пьезокерамические оболочки. При этом заданными полагались такие параметры электрических генераторов, как электрическое напряжение, внутренний импеданс и топология электрических цепей, соединяющих генераторы с пьезокерамическими оболочками, а искомыми - колебательные скорости оболочек и звуковое поле, по характеристикам и параметрам которых получен и проанализирован большой объем количественных данных.

Автор защищает:

1. Постановку и решение (в том числе и численное), "сквозной" задачи об излучении звука конечной системой соосных пьезокерамических оболочек, возбуждаемых электрическими генераторами.
2. Установленные количественные связи между колебательными скоростями оболочек, акустическим полем и геометрическими, волновыми, физическими характеристиками излучателя.
3. Способы повышения энергетической эффективности рассматриваемого источника звука.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- 1) использованием строгих дифференциальных уравнений (в рамках известных допущений) - уравнения Гельмгольца и уравнения колебания тонких пьезокерамических оболочек;
- 2) применением точного аналитического метода (частичных областей) для отыскания решения задачи, а именно, поля излучения и колебательных скоростей оболочек;
- 3) контролем точности выполнения граничных условий, условий "сшивки" на границах частичных областей, контролем соблюдения закона сохранения энергии при численном решении задачи.

Практическая ценность результатов работы. Результаты исследований, изложенные в диссертации, могут быть использованы в прикладной акустике для рационального проектирования мощных эффективных излучателей звука, выполненных в виде линейных антенных решеток.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на:

- XVI конференции молодых ученых Института механики АН Украины (Киев, 1991 г.);

- республиканском научном семинаре по гидромеханике в Институте гидромеханики АН Украины (руководитель - чл.-корр. АН Украины, проф. Гринченко В.Т., Киев, 1992 г.).

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения, изложенных на 66 страницах машинописного текста, трех таблиц, 46 страниц графического материала, списка литературы из 65 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы, приводится литературный обзор по исследуемому вопросу, определяются цель и задачи исследований.

В первой главе диссертации приведена постановка задачи излучения, включающая в себя уравнения движения пьезокерамических оболочек, возбуждаемых гармоническими электрическими сигналами, уравнения движения акустической среды, представляющей собой идеальную сжимаемую жидкость, граничные условия и условие излучения Зоммерфельда. На основе модифицированного метода частичных областей получены аналитические выражения для потенциала скорости жидкости в виде рядов по спецфункциям. Получена бесконечная система линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов в разложениях для потенциала скорости жидкости и колебательных скоростей оболочек. Построен численный алгоритм решения задачи, проведена его апробация, включающая контроль точности выполнения граничных условий, условий сопряжения на границах частичных областей, закона сохранения энергии.

Во второй главе диссертации проведен численный анализ влияния волновых размеров системы оболочек, числа оболочек в наборе, толщины и механической добротности оболочек на излучаемую акустическую мощность, колебательные скорости оболочек, направленные свойства антенной решетки в предположении, что каждая из оболочек возбуждается идеальным электрическим генератором, внутренний импе-

данс которого равен нулю. Рассмотрен вопрос о возможности управления характеристиками поля, в частности, вопрос повышения энергетической эффективности исследуемого источника звука. В третьей главе изучены энергетические, направленные, диапазонные свойства цилиндрического излучателя в зависимости от величины и характера внутреннего импеданса питающих электрических генераторов. Анализ полученных данных проведен путем непосредственного сопоставления с соответствующими данными, представленными во второй главе для случая идеального электрического генератора. Исследовано влияние топологии соединительных электрических цепей на величину излучаемой акустической мощности при возбуждении системы оболочек общим генератором. Проведено рассмотрение некоторых характерных модельных ситуаций, возникающих в прикладных задачах гидроакустики, связанных с наличием "пассивных" (не излучающих) оболочек в антенной решетке.

В заключении приводятся основные выводы диссертационной работы.

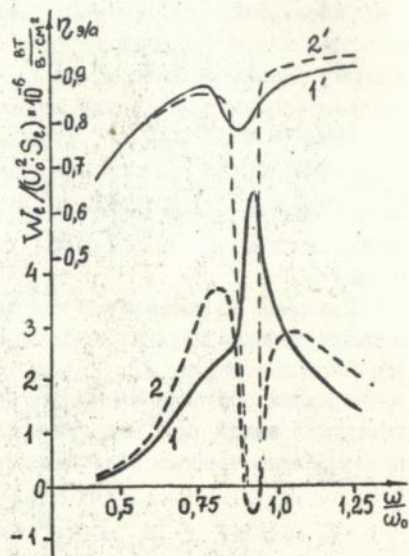
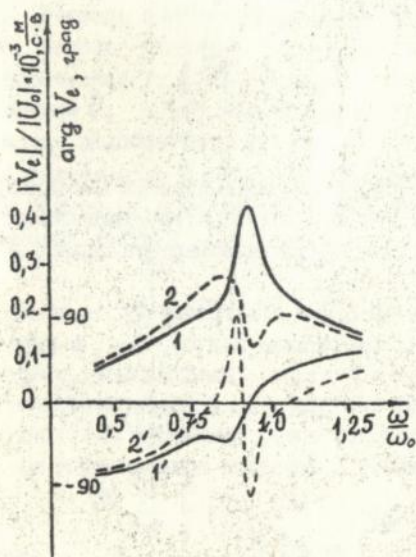
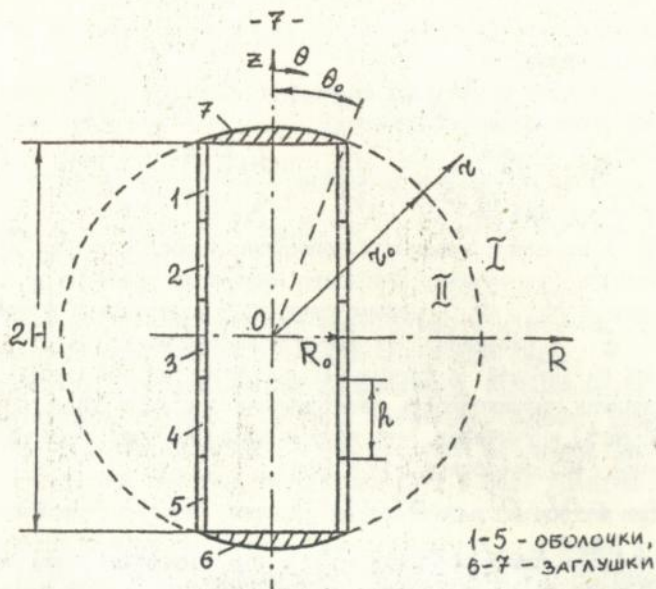
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Рассматривается осесимметричная задача об излучении звука конечной по длине системой, состоящей в общем случае из L круглых соосных цилиндрических оболочек (рис. 1), колебания которых возбуждаются гармоническими электрическими сигналами. Предполагается, что среда, в которой расположен излучатель, является идеальной сжимаемой жидкостью с полностью \mathcal{D}_0 и скоростью звука c . Искомые величинами задачи являются колебательные скорости оболочек V_k и потенциал скорости жидкости Φ .

В рамках линейной теории движение акустической среды описывается уравнением Гельмгольца:

$$\Delta \Phi + k^2 \Phi = 0, \quad k = \omega/c \quad (1)$$

В работе рассматривается только случай радиальных колебаний оболочек. Предполагается, что оболочки выполнены из предварительно радиально поляризованной по толщине пьезокерамики и их цилиндрические поверхности электродированы. На электроды каждой оболочки подается электрическое напряжение, в общем случае имеющее свою амплитуду и фазу. Предполагается, что торцы системы закрыты акустически жесткими заглушками; во внутреннем объеме вакуум; щели между



оболочками отсутствуют, однако на их взаимные смещения ограничения не накладываются.

Для описания радиальных колебаний оболочек используются следующие дифференциальные уравнения:

$$g_1 \delta \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + \frac{\delta}{R_0 S^E} \xi + \mu \frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{d_{31} E \delta}{R_0 S^E} + \Delta P, \quad (2)$$

где ξ - смещение срединной поверхности оболочки; d_{31} , S^E , g_1 , μ - пьезомодуль, жесткость, плотность материала оболочки и сопротивление потерь; R_0 , δ - радиус срединной поверхности и толщина оболочки; E - напряженность электрического поля; ΔP - разность давлений на внешней и внутренней поверхностях оболочки.

Принимая напряженность электрического поля в форме $E = E_0 \cdot \exp(-j\omega t)$ и учитывая, что внутри оболочки поле отсутствует, уравнение (2) преобразуется к виду:

$$F_e + V_e Z_e = N_e U_e, \quad (3)$$

где $l = \overline{1, L}$ - номер оболочки; V_e и F_e - колебательная скорость и сила реакции среды на внешнюю поверхность l -ой оболочки,

$$Z_e = -j\omega M_e \left(1 - \frac{\omega_{oe}^2}{\omega^2} + j \frac{\omega_{oe}}{\omega Q_e} \right),$$

$$N_e = d_{31} 2\pi h_e / S^E, \quad U_e = E_e \delta,$$

$$\omega_{oe}^2 = (g_1 R_0^2 S^E)^{-1},$$

здесь Z_e , M_e , Q_e , N_e , h_e - собственный механический импеданс, масса, механическая добротность, коэффициент электромеханической связи, высота l -ой оболочки; ω_{oe} - собственная частота оболочки в вакууме.

Принимая во внимание, что на практике электрический источник питания характеризуется некоторыми значениями э.д.с. \mathcal{E}_e и внутреннего импеданса Z_{ie} , а также учитывая существование между электродами оболочки электрической емкости C_{oe} (диэлектрическими потерями ввиду их малости пренебрегается), уравнение (3) с использованием теоремы об эквивалентном генераторе приводится к виду:

$$F_e + V_e (Z_e + N_e^2 Z_{ie}^*) = \mathcal{E}_e^* N_e, \quad (4)$$

где

$$Z_{ie}^* = \frac{Z_{ie} X_{oe}}{Z_{ie} + X_{oe}}, \quad \epsilon_e^* = \frac{\epsilon_e X_{oe}}{Z_{ie} + X_{oe}},$$

$$X_{oe} = j \frac{1}{\omega C_{oe}}, \quad C_{oe} \approx \epsilon_{33}^T (1 - k_{31}^2) 2\pi R_o h_e / \delta,$$

где ϵ_{33}^T и k_{31} - диэлектрическая проницаемость материала оболочки и энергетический коэффициент электромеханической связи.

Таким образом, математическая формулировка гармонической задачи излучения звука соосной системой пьезокерамических цилиндрических оболочек, расположенной в безграничной идеальной сжимаемой жидкости, в рамках линейной теории включает в себя уравнения (1), (4), граничные условия, выражающие равенство скоростей жидкости и поверхности излучателя на границе раздела сред, а также условие излучения Зоммерфельда, выражающее тот факт, что все составляющие излученного поля на большом удалении от излучателя представляют собой сферическую волну, уносящую энергию на бесконечность.

Решение задачи строится на базе использования модифицированного метода частичных областей, в соответствии с которым вводятся сферическая (r, θ) и цилиндрическая (R, z) системы координат с общим центром O , а вся область существования звукового поля разбивается на две подобласти (рис. 1): I подобласть: $r \geq r_o, 0 \leq \theta \leq \pi$, II подобласть: $r \leq r_o, \theta_o \leq \theta \leq \pi - \theta_o, R \geq R_o, |z| \leq H$. Потенциалы скоростей в указанных подобластях принимаются в форме следующих наборов частных решений уравнения Гельмгольца:

$$\varphi_1 = \sum_{n=0}^{\infty} A_n h_n^{(1)}(kr) P_n(\cos \theta), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \varphi_2 = & \sum_{m=0}^{\infty} B_m M_o^{(1)}(k_m R) \cos \frac{m\pi}{2H} (z + H) + \\ & + \sum_{\nu=0}^{\infty} C_\nu i_{q_\nu}(kz) \Delta q_\nu(\cos \theta), \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$k_m = \sqrt{k^2 - \left(\frac{m\pi}{2H}\right)^2},$$

$$M_o^{(k)}(k_m R) = \begin{cases} H_o^{(k)}(k_m R), & k \geq \frac{m\pi}{2H}, \\ K_o(k_m R), & k < \frac{m\pi}{2H}, \end{cases}$$

$$\Delta_{q_v}(\cos \theta) = P_{q_v}(\cos \theta) + D_v Q_{q_v}(\cos \theta),$$

q_v и D_v определяются из системы

$$\partial \Delta_{q_v}(\cos \theta) / \partial \theta = 0, \quad \theta = \theta_o, \quad \theta = \pi - \theta_o,$$

(здесь приняты стандартные обозначения для радиальных и угловых функций.)

Выражение для φ_1 представляет собой частное решение уравнения Гельмгольца в сферической системе координат и описывает расходящиеся сферические волны, удовлетворяющие условию излучения Зоммерфельда на бесконечности. Первый из рядов в выражении для φ_2 удовлетворяет почленно уравнению Гельмгольца в цилиндрической системе координат, и за счет надлежащего выбора комплексных коэффициентов B_m позволяет выполнить граничное условие на боковой поверхности излучателя $R=R_o, |z| \leq H$. Второй ряд удовлетворяет уравнению Гельмгольца в сферической системе координат и позволяет выполнить условия сопряжения полей на сферической поверхности $z=z_o, \theta_o \leq \theta \leq \pi - \theta_o$. В силу указанного представления полей в подобластях выражение, объединяющее φ_1 и φ_2 , является полным решением уравнения Гельмгольца в области существования звукового поля.

Система функциональных уравнений, объединяющая условия непрерывности поля скоростей и давлений на границе подобластей, граничные условия на поверхностях рассматриваемого источника звука и уравнения движения оболочек, формулируется следующим образом:

$$-\frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = \begin{cases} 0, & 0 \leq \theta \leq \theta_o, \\ -\frac{\partial \varphi_2}{\partial z}, & \theta_o \leq \theta \leq \pi - \theta_o, \\ 0, & \pi - \theta_o \leq \theta \leq \pi, \end{cases} \quad z = z_o. \quad (7)$$

$$\varphi_1 = \varphi_2, \quad \theta_0 \leq \theta \leq \pi - \theta_0, \quad z = z_0, \quad (8)$$

$$-\frac{\partial \varphi_2}{\partial R} = \begin{cases} V_1, & H - R_1 \leq z \leq H, \\ \text{-----}, & R = R_0, \\ V_2, & -H \leq z \leq -H + R_2, \end{cases} \quad (9)$$

$$2\pi R_0 \int_{H-R_1}^H p_2 dz + V_1 (Z_1 + Z_{11}^* N_1^2) = \varepsilon_1^* N_1, \quad (10)$$

$$\text{-----}, \\ 2\pi R_0 \int_{-H}^{-H+R_2} p_2 dz + V_2 (Z_2 + Z_{22}^* N_2^2) = \varepsilon_2^* N_2,$$

Здесь $p_2 = -j\omega g_0 \varphi_2$.

Алгебраизация уравнений (7) - (10) проводится с учетом свойств полноты и ортогональности соответствующих систем функций, используемых в разложениях (5) - (6). Бесконечная система линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов

A_n, B_m, C_ν и колебательных скоростей оболочек V_e является исходной для получения количественных данных. В ходе подготовки алгоритма численного решения задачи получены необходимые (не имеющиеся в литературе) значения собственных чисел q_ν , собственных функций $\Delta q_\nu(\cos \theta)$ для биконической области сферической системы координат для углов раскрытия биконуса, соответствующих изменению угла θ_0 от 5° до 65° с шагом 5° ; проведен контроль точности выполнения граничных условий, условий сопряжения полей на границе подобластей для системы, состоящей из пяти идентичных оболочек, выполненных из пьезокерамики ЦТС-3, серийно выпускаемой промышленностью. Количество комплексных неизвестных, удерживаемых в фактически решаемой алгебраической системе, выбиралось из обеспечения невязки по модулю скорости на поверхности оболочек ($R = R_0$)

в среднем не более 3 %, невязка компонент поля на сферической поверхности ($\tau = \tau_0$) не более 5 - 7 %. Отметим, что в пределах узких зон, расположенных непосредственно вблизи кольцевых ребер $\tau = \tau_0$, $\theta = \theta_0$, $\theta = \pi - \theta_0$, невязка по модулю скорости могла достигать 50 %. Получение более точных оценок поля в этих зонах требовало бы использования специальных приемов. Однако изучение локальной структуры ближнего поля не входило в рамки работы, а влияние поля вблизи ребер на интегральные характеристики оказалось несущественным. Это подтверждалось в частности, тем, что невязка по излучаемой мощности (сравнивалась величина мощности на поверхности оболочек и в дальней зоне) не превышала 2 %.

Первый этап численного исследования был связан с рассмотрением ситуации, когда на все оболочки системы подавалось одинаковое электрическое напряжение $U_0 = \varepsilon_0$ от идеального генератора $Z_{ie} = 0$ (последнее допущение может успешно моделировать практическую ситуацию, когда внутренний импеданс питающего электрического генератора намного меньше входного электрического импеданса преобразователя). При этом изучалось влияние волновых размеров системы оболочек, числа оболочек в наборе, толщины, механической добротности оболочки на характеристики поля излучения в широком диапазоне частот. Особое внимание при анализе полученных данных уделялось эффекту акустического взаимодействия в системе. Так, на рис. 2 и 3 представлены частотные зависимости нормированных модулей (кривые 1, 2, рис. 2) и фаз (кривые 1', 2', рис. 2) колебательных скоростей оболочек (рассматривалась система из трех идентичных оболочек), а также их нормированных удельных излучаемых мощностей (кривые 1, 2 рис. 3) и электроакустических к.п.д. (кривые 1' и 2', рис. 3). Заметим, что в силу симметрии задачи относительно плоскости $z = 0$ имело место равенство $V_4 = V_3$, поэтому на указанных рисунках количественные данные приведены для двух оболочек, причем номера кривых на рисунках соответствуют номерам оболочек в наборе. В приведенных зависимостях естественно выделяются три характерные зоны: первая (низкочастотная) зона на $\omega/\omega_0 \leq 0,7$, вторая (резонансная) зона $0,7 \leq \omega/\omega_0 \leq 1,1$ и третья (высокочастотная) зона на $\omega/\omega_0 \geq 1,1$. Как видно из графиков, в первой зоне колебательные скорости оболочек, их излучаемые мощности и к.п.д. достаточно быстро падают с понижением частоты, и, главное, эти параметры становятся практически одинаковыми у обеих оболочек. Оче-

видно, это связано с тем, что с понижением частоты быстро растет собственный механический импеданс оболочек, в то время как импеданс излучения падает. Поэтому влияние акустического взаимодействия на скорости оболочек незначительно, и колебательные скорости полностью определяются собственными механическими импедансами оболочек. На высоких частотах (в третьей зоне) уменьшение колебательных скоростей, но уже с ростом частоты, также обусловлено увеличением собственного механического импеданса оболочек, который в этой зоне имеет инерционный характер. Здесь тоже наблюдается тенденция к выравниванию скоростей и мощностей оболочек, однако не столь быстрая, как в первой зоне, ибо действительная часть импеданса излучения растет с частотой и роль акустического взаимодействия более весома, чем в первой зоне.

В резонансной зоне собственные механические импедансы оболочек становятся сравними с их импедансами излучения, и существенную роль начинают играть реакция среды и обмен энергией оболочками по полю. В этой зоне характеристики центральной оболочки существенно отличаются от аналогичных характеристик крайних оболочек. Особое внимание привлекает эффект, проявляющийся в резонансной зоне в окрестности частоты $\omega/\omega_0 \approx 0,88$ когда фаза скорости центральной оболочки становится по модулю большей $\frac{\pi}{2}$ (кривая 2, рис. 2), т.е. вектор скорости переходит в левую полуплоскость комплексной плоскости, а действительная часть импеданса излучения становится отрицательной. Это значит, что становится отрицательной и действительная часть полного механического импеданса, и оболочка вместо излучения звуковой энергии начинает поглощать энергию из поля. Этот факт подтверждается ходом частотной зависимости излучаемой мощности и к.п.д.: на указанной частоте мощность принимает отрицательное значение (кривая 2, рис. 3), а к.п.д. падает до нуля (кривая 2', рис. 3). Появление такого эффекта вызвано сильным взаимодействием центральной и крайних оболочек. Явления подобного рода, возникающие в других акустических антенных системах, описаны в литературе (Карновский М.И. (1941), Rusby J.S.M. (1964), Hueter T.F. (1971), Audoly C. (1991)).

Проводится численное исследование проявления эффекта акустического взаимодействия в зависимости от расстояния между оболочками в наборе (шага антенной решетки), волновой высоты оболочек. Получены сравнительные характеристики энергетической эффективности, направленных свойств решетки для различных значений вышеуказанных

параметров.

Рассматривается влияние числа оболочек в наборе ($L = 3, 5, 7, 9$) на характеристики поля. Показано, что увеличение L приводит к определенной стабилизации такой интегральной характеристики системы, как осредненная излучаемая мощность оболочки в наборе, в то время как выравнивания параметров отдельных элементов системы не происходит, и для их определения необходима строгая постановка задачи (учет конечности, эффектов взаимодействия и т.д.)

На примере пятиэлементного набора изучается влияние толщины, механической добротности оболочек на характеристики поля.

В связи с тем, что эффект акустического взаимодействия может в определенных ситуациях приводить к нежелательным энергетическим потерям, рассматривается вопрос о возможных способах их устранения. Один из путей, позволяющих повысить энергетическую эффективность исследуемого излучателя и в то же время не допустить, чтобы значения колебательных скоростей оболочек превысили предельную величину $V_{гop}$ (выше которой наступает механическое разрушение оболочки), заключается в том, чтобы заставить все оболочки колебаться с одинаковой скоростью, но несколько более низкой, чем скорость, при которой достигаются предельные механические напряжения в материале оболочки. Исходя из этой посылки, в постановку задачи вносятся соответствующие изменения, причем искомыми становятся значения электрических напряжений U_e , а заданными - значения $V_e = V_{гop}$. Результаты численных расчетов показали, что поддержание равных колебательных скоростей на всех оболочках позволяет существенно увеличить излучаемую мощность как отдельных оболочек, так и системы в целом; полностью устранить эффект перехода оболочек из режима излучения энергии в режим ее поглощения из поля, а также улучшить направленные свойства решетки.

На втором этапе численного исследования задачи основное внимание уделяется, во-первых, вопросу изменения характеристик поля, обусловленного учетом внутренних свойств реальных электрических источников питания, а именно - величины и характера внутреннего импеданса $Z_{иc}$, топологии соединительных электрических цепей; во-вторых, изучению ситуаций, когда электрическими генераторами возбуждается только часть оболочек в системе. Анализ некоторых параметров проводится путем непосредственного сопоставления со случаем $Z_{иc} = 0$ для набора, составленного из пяти идентичных оболочек.

Приводятся количественные данные, свидетельствующие о том, что с ростом величины Z_{ie} (полагалось, что внутренний импеданс генератора носит чисто активный характер) излучаемая оболочками акустическая мощность в целом падает. Снижение акустической мощности обусловлено тем, что часть мощности электроакустического источника рассеивается на его внутреннем сопротивлении. Предлагается способ, позволяющий увеличить долю электрической энергии, преобразующуюся в акустическую, и состоящий в подключении параллельно емкости C_{0e} компенсационной катушки, величина индуктивности которой выбирается таким образом, чтобы резонансная частота контура находилась в области частот максимального излучения энергии системой оболочек. Расчеты показали, что использование компенсационной катушки позволило увеличить величину удельной мощности излучения в резонансной области в среднем на 20 %, а также снизить уровень излучения в направлении оси симметрии антенной решетки.

Рассматривается ситуация, когда преобразователи в решетке запитываются от одного общего электрического генератора. Численные данные получены для двух случаев: когда все оболочки электрически соединены параллельно и когда оболочки соединены последовательно. Установлено, что при этом возникает эффект взаимодействия оболочек не только по полю, но и через соединительные электрические цепи, в результате чего физические процессы в системе еще более усложняются.

Исследованы также случаи, когда электрические генераторы возбуждают не все элементы излучающей антенной решетки, а лишь некоторое их число. В частности, рассмотрен случай, когда электрическое напряжение подается только на одну (среднюю) оболочку. При этом обнаруживается важный эффект: колебания "активной" оболочки через окружающую среду возбуждают значительные колебания остальных ("пассивных") оболочек. Этот интересный факт указывает на существенное проявление эффекта акустического взаимодействия, вследствие которого "пассивные" оболочки начинают поглощать из ближнего поля энергию, излучаемую "активной" оболочкой. В результате возникает значительная разница между величиной акустической энергии в дальнем поле и величиной энергии, излучаемой на поверхности "активной" оболочки. Показано, что уровень мощности, поглощаемый "пассивными" оболочками, существенно зависит от величины и от характера импеданса Z_{ie} , включенного в электрическую цепь этих оболочек. Изме-

нением величины и характера импеданса проводится моделирование интересных с практической точки зрения ситуаций (обрыв соединительных электроцепей, их короткое замыкание и другие возможные ситуации). Приводятся данные, характеризующие энергетическую эффективность цилиндрических излучателей в таких ситуациях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Построена математическая модель цилиндрического излучателя конечной высоты, состоящего из нескольких соосных тонких цилиндрических пьезоупругих оболочек, возбуждаемых электрическими генераторами. На основе модифицированного метода частичных областей построено общее решение "сквозной" задачи об излучении звука указанной системой. При этом заданными являются физические, геометрические и волновые характеристики системы, электрические напряжения и внутренние импедансы генераторов, а искомыми - колебательные скорости оболочек и характеристики ближнего и дальнего поля излучения.

2. Разработан и реализован алгоритм численного решения задачи. Выполнены численные эксперименты и установлены зависимости между точностью вычислений искомым характеристикам и количеством неизвестных, которое необходимо удерживать при фактическом решении соответствующих алгебраических систем уравнений.

3. Выполнены исследования в широком диапазоне физических, геометрических, волновых характеристик оболочек и системы в целом при различных способах питания пьезокерамических оболочек и их электрического соединения.

Установлено:

а) существенное проявление акустического взаимодействия между оболочками может приводить к тому, что некоторые оболочки системы переходят из режима излучения энергии в режим ее поглощения из внешней среды;

б) наращивание L приводит к определенной стабилизации интегральных характеристик системы (например, осредненной по L излучаемой системой мощности), в то время как выравнивания параметров отдельных оболочек (особенно крайних) в системе не происходит;

в) увеличение волновой высоты оболочек, шага решетки снижает влияние эффекта взаимодействия на акустические характеристики;

г) уменьшение толщины, увеличение механической добротности

оболочки повышает чувствительность системы к эффекту взаимодействия по полю, в результате чего большее количество оболочек в системе может переходить в режим поглощения энергии из поля;

д) при запитке системы одним общим электрическим генератором наблюдается взаимодействие пьезокерамических оболочек не только по полю, но и через соединительные электроцепи; при этом показано, что эти два эффекта могут быть одного порядка;

е) при возбуждении генераторами лишь некоторого числа оболочек, в системе возникает эффект поглощения излучаемой энергии остальными ("пассивными") оболочками; смоделированные ситуации короткого замыкания, холостого хода, обрыва соединительных электроцепей показали, что при этом происходит существенная потеря акустической энергии в ближнем поле; снижение потерь может достигаться введением компенсационных катушек;

ж) подбором соответствующих величин электрических напряжений U_e , обеспечивающих условие равенства колебательных скоростей оболочек в системе, удастся существенно повысить энергетическую эффективность системы и улучшить ее направленные свойства.

4. Получены количественные исходные данные и разработаны рекомендации для рационального проектирования цилиндрических излучателей в виде линейной антенной решетки.

Основные результаты работы отражены в следующих публикациях:

1. Гринченко В.Т., Вовк И.В., Савин Э.О. Излучение звука системой соосных пьезокерамических цилиндрических оболочек // Докл. АН УССР. Сер. А. - 1991. - № 9. - С. 72 - 76.
2. Савин Э.О. Взаимодействие цилиндрических пьезоактивных оболочек в жидкости // Труды XVI научной конференции молодых ученых Института механики АН Украины. Киев, 1991. - Ч. 2. - С. 348 - 352. - Деп. в ВИНТИ 28.10.1991 N 4260 - В 91.

Савин

Подписано к печати 10.03.1993г. Формат 60x84/16
Бумага офсетная Усл.-печ.лист.10. Уч.-изд.лист.10.
Тираж 100. Заказ 313, Бесплатно

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

465672

AB 27.464

AB 27.464