

УДК 539.3

АКУСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ВНУТРЕННИМ ТВЕРДЫМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

© 1999 г. С. М. Балабаев, Н. Ф. Ивина

690091 Владивосток, ул. Уткинская, 13–10

Поступила в редакцию 17.10.97 г.

Комбинированным методом конечных и граничных элементов выполнен анализ акустического излучения цилиндрического пьезопреобразователя с внутренним твердым пассивным заполнением. Показано, что при заполнении пьезоцилиндра материалом с небольшим акустическим сопротивлением частотная характеристика чувствительности в режиме излучения такого пьезопреобразователя имеет при определенных геометрических размерах два максимума, аналогично водозаполненному (свободно-погруженному) пьезоцилиндру. Определены оптимальные геометрические размеры пьезопреобразователя, при которых достигается высокая чувствительность, небольшая неравномерность частотной характеристики и широкая полоса пропускания.

Бесконечный радиально поляризованный пьезоцилиндр с внутренним твердым пассивным заполнением рассмотрен в статье [1] в рамках одномерной аналитической модели; исследованы зависимости резонансной частоты, относительной полосы пропускания и мощности излучения на резонансе от материала заполнителя и толщины стенки пьезоцилиндра.

Целью данной статьи является анализ подобной конструкции с учетом конечной высоты пьезоцилиндра. Это позволит не только уточнить выводы, полученные в статье [1], но и получить новые качественные и количественные результаты.

Наиболее универсальными методами анализа излучающих структур произвольной геометрической формы и размеров являются численные методы: метод конечных элементов и метод граничных элементов [2–4]. В работах [5, 6] рассмотрен комбинированный метод конечных и граничных элементов с учетом пьезоэффекта. Показано, что в комбинированном методе вынужденные колебания пьезопреобразователя с учетом пьезоэффекта и акустического излучения в воду описываются системой линейных алгебраических уравнений большого порядка. Комбинированный метод конечных и граничных элементов позволяет определить все основные характеристики пьезопреобразователя, в том числе частотные характеристики, диаграммы направленности, а также распределения скорости и давления на излучающих поверхностях.

Рассмотрим цилиндрический секционированный (32 призмы) пьезопреобразователь, выполненный из пьезокерамики ЦТБС-3, с внутренним твердым пассивным заполнением (контакт пьезоцилиндра и заполнения является жестким), вся

внешняя поверхность пьезопреобразователя находится в контакте с водой. Параметры пьезокерамики приняты равными: $c_{11}^E = 15.1 \times 10^{10}$ Н/м², $c_{12}^E = 7.9 \times 10^{10}$ Н/м², $c_{13}^E = 8 \times 10^{10}$ Н/м², $c_{33}^E = 13.6 \times 10^{10}$ Н/м², $c_{44}^E = 2.9 \times 10^{10}$ Н/м², $e_{33} = 17.7$ К/м², $e_{31} = -7.9$ К/м², $e_{15} = 15.4$ К/м², $\epsilon_{33}^S/\epsilon_0 = 1280$, $\epsilon_{11}^S/\epsilon_0 = 1610$, $\rho = 7200$ кг/м³. Расчетная модель и ее геометрические размеры представлены на рис. 1; при расчетах использованы пьезоактивные и пассивные конечные элементы и граничные элементы с квадратичной аппроксимацией, размеры пьезопреобразователя представлены безразмерными отношениями l/a и R/a .

На рис. 2а приведены частотные характеристики чувствительности в режиме излучения v в точке дальнего поля на плоскости симметрии пьезоцилиндра.

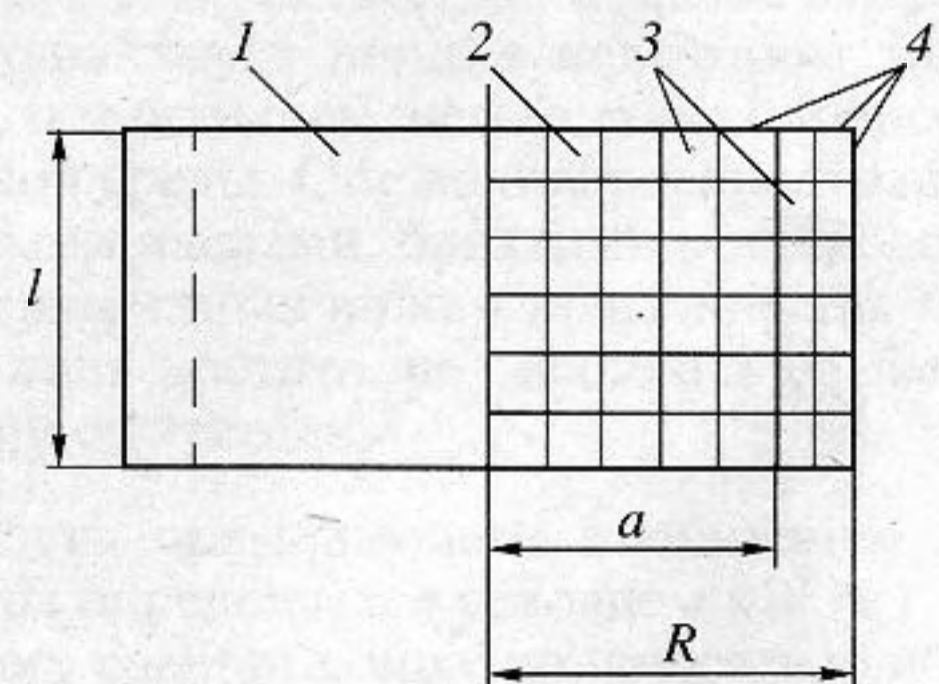


Рис. 1. Расчетная модель и ее разбиение на конечные и граничные элементы: 1 – пьезоцилиндр, 2 – внутреннее твердое заполнение, 3 – конечные элементы, 4 – граничные элементы.

зоцилиндра (в дБ относительно уровня 1 мкПа/В при 1 м) при фиксированной толщине стенки пьезоцилиндра $R/a = 1.2$ и изменении его высоты, заполнение – эбонит. Параметры эбонита приняты равными: плотность – 1200 кг/м^3 , скорость продольной волны – 2230 м/с , скорость поперечной волны – 1020 м/с . По оси абсцисс здесь и далее отложена частота, нормированная на частоту радиального резонанса пьезоцилиндра без заполнения в воздухе, безразмерная частота f .

На рис. 2а видно, что при заполнении пьезоцилиндра материалом с малым акустическим сопротивлением и при определенных геометрических размерах частотная характеристика чувствительности имеет два максимума, подобно частотной характеристике водозаполненного (свободно-погруженного) пьезоцилиндра. Первый (низкочастотный) максимум связан с резонансом внутреннего заполнения (точнее с резонансом системы пьезоцилиндр–внутреннее заполнение–часть окружающей жидкости), а второй – с радиальным резонансом пьезоцилиндра. Чувствительность в режиме излучения близка к чувствительности водозаполненного пьезоцилиндра [5], частотная характеристика более равномерная, но относительная ширина полосы пропускания уже: 60% (для водозаполненного пьезоцилиндра – 75%).

Зависимости, представленные на рис. 2а (и им подобные) позволяют выбрать оптимальные геометрические размеры пьезопреобразователя, при которых достигается высокая чувствительность в режиме излучения, небольшая неравномерность частотной характеристики и широкая полоса пропускания. За критерий оптимальности принято примерное равенство чувствительности на частотах объемного и радиального резонансов, при этом чувствительность в минимуме частотной характеристики не должна уменьшаться более, чем на 3 дБ от чувствительности на резонансах. Как следует из рис. 2а, хорошие результаты получаются при $l/a \approx 1.3$. Это значение близко к соответствующему размеру водозаполненного пьезоцилиндра [5]. Отметим, что в статье [5] геометрические размеры нормируются на наружный радиус пьезоцилиндра, в данном случае на R . При такой нормировке оптимальная высота пьезопреобразователя $l/R \approx 1.1$, толщина стенки $h/R \approx 0.17$ ($h = R - a$), то есть оптимальная высота пьезоцилиндра с эбонитом близка к оптимальной высоте водозаполненного пьезоцилиндра ($l/R \approx 1$). При высоте пьезоцилиндра меньше оптимальной чувствительность в режиме излучения на радиальном резонансе меньше, чем на объемном, а при высоте больше оптимальной – наоборот.

На рис. 3а приведены нормированные диаграммы направленности в вертикальной плоскости пьезопреобразователя оптимальной высоты на трех частотах, соответствующих трем экстрему-

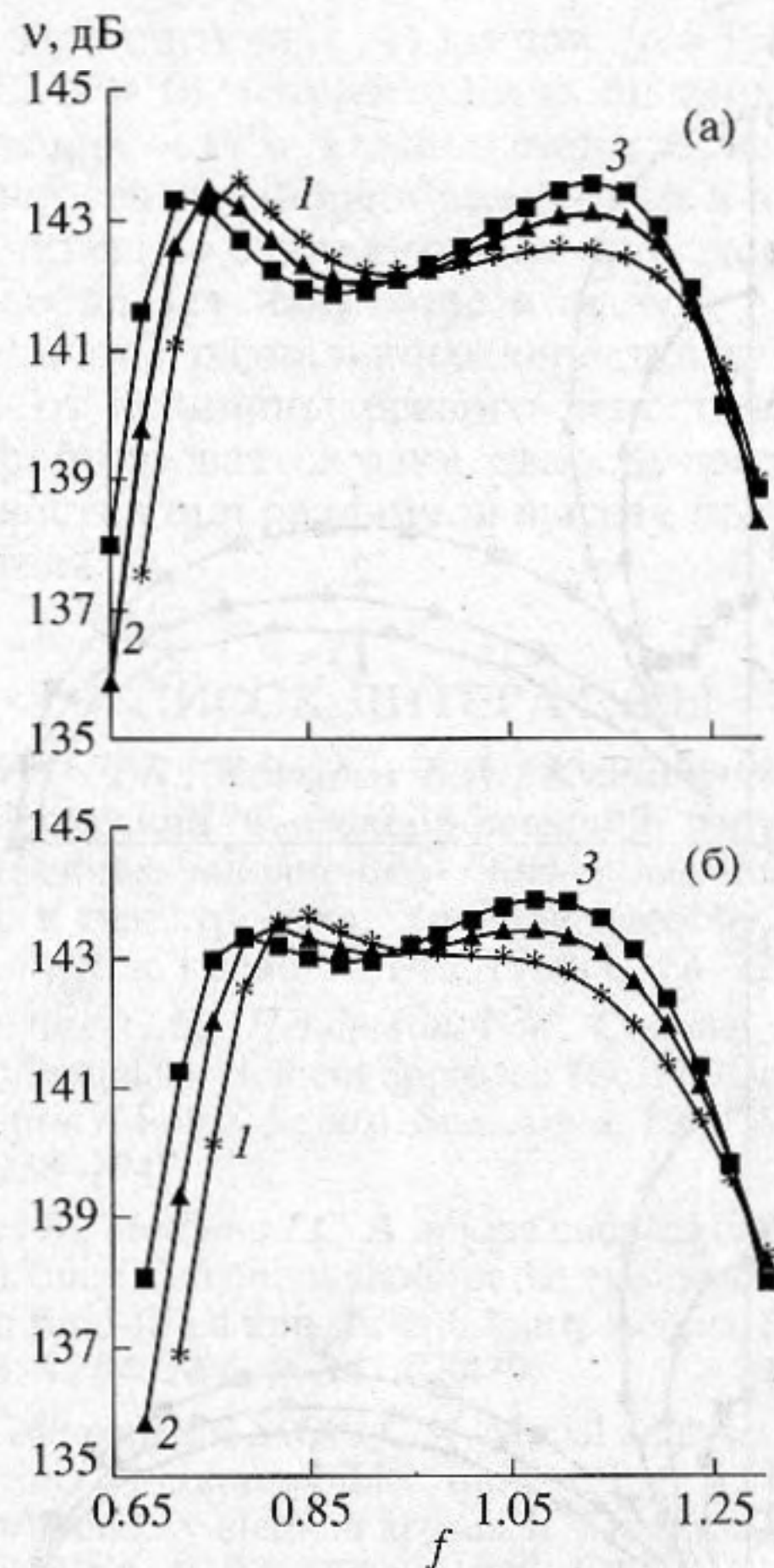


Рис. 2. Частотные характеристики чувствительности в режиме излучения, $R/a = 1.2$: а – заполнение – эбонит, 1 – $l/a = 1.2$, 2 – $l/a = 1.3$, 3 – $l/a = 1.4$; б – заполнение – сферопластик, 1 – $l/a = 1$, 2 – $l/a = 1.1$, 3 – $l/a = 1.2$.

мам частотной характеристики. Из представленных кривых видно, что характеристики направленности пьезоцилиндра с твердым заполнением в отличие от водозаполненного пьезоцилиндра [5] значительно изменяются в пределах его полосы пропускания: при приближении к частоте объемного резонанса увеличивается осевой лепесток, достигая по величине радиального. Это объясняется тем, что на объемном резонансе внутреннего (твердого в этом случае) заполнителя на его излучающих торцах создаются большие величины нормальной колебательной скорости и давления.

В спектре собственных частот пьезоцилиндра с эбонитом при $l/a = 1.3$, $R/a = 1.2$ в рассматриваемом частотном диапазоне присутствуют следующие моды колебаний, безразмерные резонансные частоты и динамические коэффициенты электромеханической связи k которых равны: $f = 0.72$, $k = 0$ для моды 1; $f = 1.01$ (частота антирезонанса 1.17), $k = 0.52$ для моды 2; $f = 1.19$, $k = 0$ для моды 3. Из рассмотрения распределений компонент смещения следует, что моды 1 и 3 являются

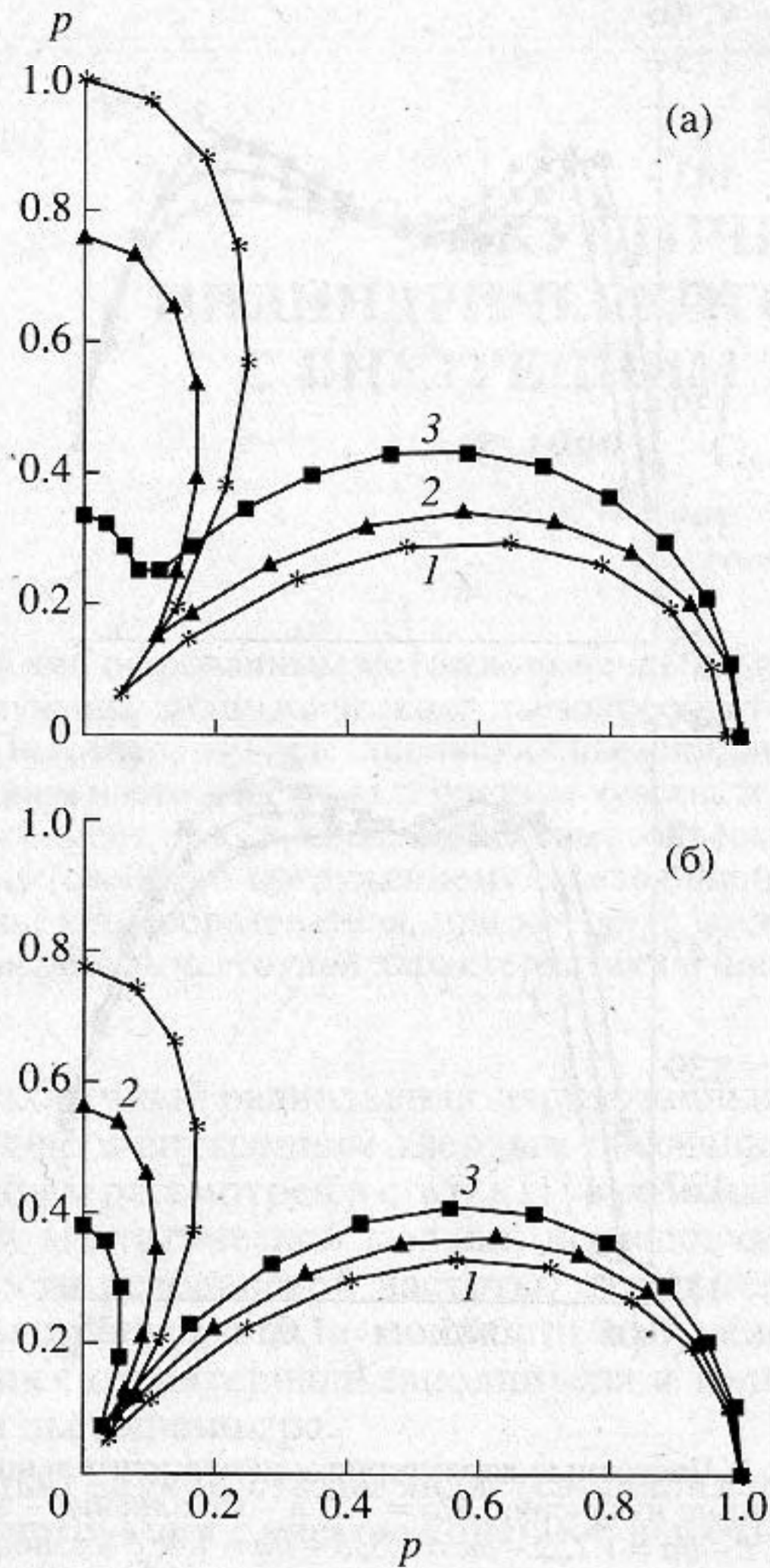


Рис. 3. Диаграммы направленности в вертикальной плоскости, $R/a = 1.2$: а – заполнение – эбонит, $l/a = 1.3$, 1 – $f = 0.76$, 2 – $f = 0.93$, 3 – $f = 1.16$; б – заполнение – сферопластик, $l/a = 1.1$, 1 – $f = 0.83$, 2 – $f = 0.96$, 3 – $f = 1.09$.

антисимметричными и имеют противофазное распределение радиальной компоненты смещения на цилиндрической поверхности; по этой причине они не возбуждаются в пьезоцилиндре со сплошными электродами. С симметричной пьезоактивной модой 2 связан радиальный резонанс пьезопреобразователя.

В пьезоцилиндре с внутренним твердым заполнением нет пьезоактивной моды, имеющей частоту ниже частоты радиального резонанса пьезоцилиндра. А именно только такой модой можно было бы объяснить низкочастотный максимум на частотных характеристиках. Таким образом, низкочастотный максимум на частотных характеристиках (как и в водозаполненном пьезоцилиндре [7]) является следствием резонанса системы пьезоцилиндр–внутреннее твердое заполнение–часть окружающей жидкости. Внутреннее

твердое заполнение с небольшим акустическим сопротивлением, близким к акустическому сопротивлению воды, выполняет роль части жидкости в водозаполненном пьезоцилиндре.

Последнее обстоятельство открывает некоторые новые возможности в “управлении” низкочастотным резонансом: твердое заполнение можно выполнять из различных легких материалов, его можно делать только частичным (занимающим часть внутреннего объема), а также изменять при этом его форму.

Так например, при заполнении пьезоцилиндра сферопластиком можно уменьшить величину осевого лепестка. На рис. 3б приведены диаграммы направленности при заполнении пьезоцилиндра сферопластиком на трех частотах, соответствующих трем экстремумам частотной характеристики. Параметры сферопластика приняты равными: плотность – 650 кг/м^3 , скорость продольной волны – 2590 м/с , скорость поперечной волны – 1236 м/с . На рис. 2б представлены частотные характеристики чувствительности в режиме излучения пьезоцилиндра со сферопластиком. Из анализа частотных характеристик чувствительности пьезоцилиндра со сферопластиком следует, что его оптимальная высота составляет $l/a \approx 1.1$ при $R/a = 1.2$. При этом частотная характеристика получается более равномерной, чем при заполнении пьезоцилиндра эбонитом, но относительная ширина полосы пропускания при этих размерах меньше 53%.

Рассматривалась также конструкция, в которой заполнение (эбонит) длиннее пьезоцилиндра. Из анализа полученных численных результатов следует, что при небольших и одинаковых выступающих частях заполнителя характер частотных характеристик не изменяется. Уменьшение высоты пьезоцилиндра при сохранении общей высоты заполнителя уменьшает чувствительность и увеличивает неравномерность частотной характеристики; диаграммы направленности при этом качественно не изменяются. Небольшая асимметрия выступающих частей заполнителя сохраняет вид частотной характеристики и увеличивает ее неравномерность. Таким образом, лучшие результаты получаются, когда заполнитель и пьезоцилиндр имеют одинаковую высоту.

Приведенные результаты получены с приближенным учетом частотно-независимых механических потерь в пьезокерамике и заполнителе. Так как точно учесть механические потери довольно сложно, особенно для двухрезонансной системы, то их учет осуществлялся приближенно путем введения комплексных волновых чисел и контроля получаемого при этом электроакустического коэффициента полезного действия (к.п.д.). Волновые числа определялись как $k = k_1(1 - i\alpha)$. На рис. 4 приведены частотные характеристики

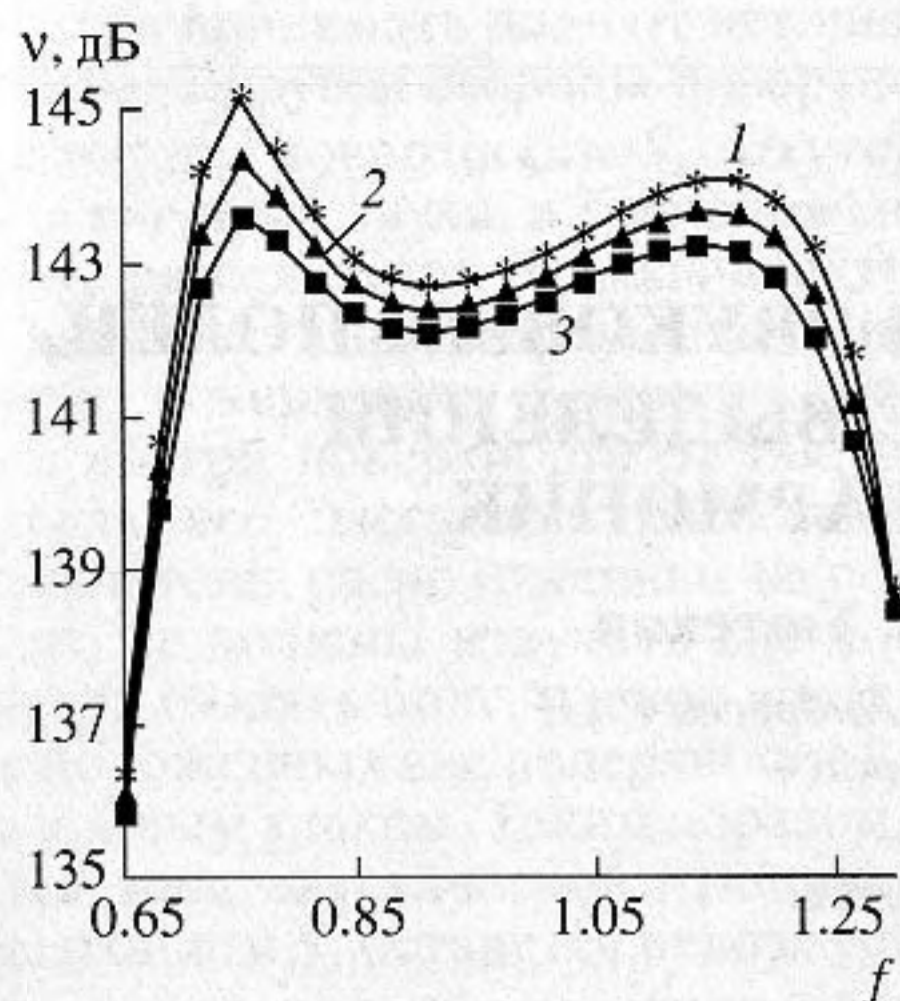


Рис. 4. Частотные характеристики чувствительности в режиме излучения, заполнение – эбонит, $l/a = 1.3$, $R/a = 1.2$: 1 – $\alpha = 0$, 2 – $\alpha = 0.02$, 3 – $\alpha = 0.04$.

чувствительности в режиме излучения при изменении α от 0 до 0.04. Из рис. 4 следует, что учет механических потерь приводит к выравниванию частотной характеристики, так как потери оказывают большее влияние на участки вблизи резонансных частот, особенно на объемный резонанс заполнителя. Все представленные выше результаты вычислены при $\alpha = 0.04$, электроакустический к.п.д. при этом составляет 0.7–0.88.

Отметим, что при заполнении пьезоцилиндра материалом с большим акустическим сопротивлением, например, алюминием, получается обычная частотная характеристика с одним максимумом на радиальном резонансе, частота которого примерно в 2 раза выше, чем для рассмотренных легких заполнителей. Это находится в согласии с результатами статьи [1] и подтверждает правильность полученных численных результатов. Чувствительность в режиме излучения на резонансе имеет примерно такую же величину, что и при

легких заполнителях (144 дБ при $l/a = 1$, $R/a = 1.2$, $f = 2.28$, $\alpha = 0$), относительная ширина полосы пропускания – 14%. Однако характеристики направленности пьезопреобразователя в этом случае значительно отличаются от приведенных выше: преобладает излучение в осевом направлении, величина радиального лепестка составляет 50–70% от величины осевого лепестка, причем могут формироваться один, два или три радиальных лепестка при различной высоте пьезопреобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дуанов Д.Б., Козырев В.А., Кузьменко А.Г. Цилиндрический пьезокерамический излучатель с внутренним заполнением / Основные задачи акустики в судостроении. Учебное пособие. Ч. 2. Л.: Изд-во Лен. корабл. ин-та, 1969. С. 64–72.
2. Everstine G.C., Henderson F.M. Coupled finite element/boundary element approach for fluid-structure interaction // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1990. V. 87. № 5. P. 1938–1947.
3. Jeans R., Mathews I.C. A unique coupled boundary element/finite element method for the elastoacoustic analysis of fluid-filled thin shells // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1993. V. 94. № 6. P. 3473–3479.
4. McCollum M.D., Siders C.M. Modal analysis of a structure in a compressible fluid using a finite element/boundary element approach // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1996. V. 99. № 4. P. 1949–1957.
5. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Анализ пьезопреобразователей комбинированным методом конечных и граничных элементов // Акуст. журн. 1996. Т. 42. № 2. С. 172–178.
6. Балабаев С.М., Ивина Н.Ф. Компьютерное моделирование колебаний и излучения тел конечных размеров (методы конечных и граничных элементов). Владивосток: Дальнаука, 1996. 213 с.
7. Вовк И.В. Излучение звука конечной решеткой, состоящей из открытых цилиндрических пьезокерамических оболочек // Акуст. журн. 1992. Т. 38. № 3. С. 427–434.

Acoustic Radiation of a Cylindrical Piezoceramic Transducer with Solid Internal Filling

S. M. Balabaev and N. F. Ivina

Acoustic radiation of a cylindrical piezoceramic transducer with solid passive internal filling is analyzed using a combined finite element–boundary element method. It is demonstrated that in the case of a filling material with low acoustic impedance, the frequency characteristic the transmitting of response of such a transducer has two peaks, which is analogous to the case of a water-filled (free-flooded) piezoceramic cylinder. For the piezoceramic transducer under study, the optimal geometric dimensions necessary for obtaining a high transmitting response, a fairly uniform frequency characteristic, and a broad transmission band are determined.