

УДК 539.3

## АНАЛИЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВОДОЗАПОЛНЕННОГО ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ВНУТРЕННЕЙ УПРУГОЙ ПЕРЕГОРОДКОЙ

© 1998 г. С. М. Балабаев, Н. Ф. Ивина

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет  
690600 Владивосток, Луговая, 52-Б

Поступила в редакцию 06.02.97 г.

Комбинированным методом конечных и граничных элементов выполнен анализ основных параметров водозаполненного тангенциально поляризованного пьезоцилиндра с внутренней упругой перегородкой. Исследована возможность формирования направленного излучения вдоль оси симметрии такого пьезопреобразователя. Показано, что при определенных геометрических размерах пьезопреобразователя формируется характеристика направленности с небольшим уровнем тыльного излучения, осевое сечение которой по форме похоже на кардиоиду.

В работе [1] рассмотрено применение метода конечных элементов к анализу пьезопреобразователей, в частности, водозаполненного (свободнопогруженного) пьезоцилиндра с тангенциальной поляризацией. Для численного интегрирования граничного интегрального уравнения Гельмгольца использована кусочно-постоянная аппроксимация неизвестных функций с применением известного метода (и программы) СНИЕФ. В статье [2] для решения подобной задачи предложен метод конечных элементов с использованием дипольных демпфирующих элементов, рассмотрен водозаполненный цилиндр с радиальной поляризацией. Однако из сравнения экспериментальных и расчетных результатов следует, что этот метод может давать значительную погрешность.

В последние годы для численного интегрирования граничного интегрального уравнения Гельмгольца широкое распространение получил метод граничных элементов, позволяющий повысить порядок аппроксимации неизвестных функций [3, 4].

В статье [5] рассмотрен комбинированный метод конечных и граничных элементов с учетом пьезоэффекта для анализа пьезокерамических преобразователей и его применение к расчету основных характеристик водозаполненного цилиндра с тангенциальной поляризацией. Изложенный метод и разработанное на его основе программное обеспечение [6] являются достаточно универсальными; их можно применить к анализу других пьезопреобразователей, в частности, представляющих собой усложненные конструкции на основе водозаполненного пьезоцилиндра.

Отметим, что результаты расчетов по разработанной программе комбинированного метода конечных и граничных элементов тщательно проверены по экспериментальным и расчетным резуль-

татам, представленным в статье [1], в которой рассмотрено акустическое излучение водозаполненного тангенциально поляризованного пьезоцилиндра конкретных геометрических размеров. Получено хорошее соответствие со всеми приведенными в [1] экспериментальными и расчетными зависимостями: частотными характеристиками чувствительности излучения, частотными зависимостями активной и реактивной составляющих электрического импеданса и диаграммами направленности. Поэтому представленные здесь результаты можно считать достаточно обоснованными.

Рассмотрим тангенциально поляризованный водозаполненный пьезоцилиндр с внутренней упругой перегородкой, представляющей собой часть сферы радиуса  $R$ . Цилиндр выполнен из пьезокерамики ЦТБС-3, параметры которой соответствуют справочным данным; перегородка — из стали, параметры которой приняты равными: плотность  $7820 \text{ кг/м}^3$ , скорость продольной волны  $5740 \text{ м/с}$ , скорость поперечной волны  $3150 \text{ м/с}$ . Расчетная модель и ее геометрические размеры представлены на рис. 1. Контакт упругой перегородо-

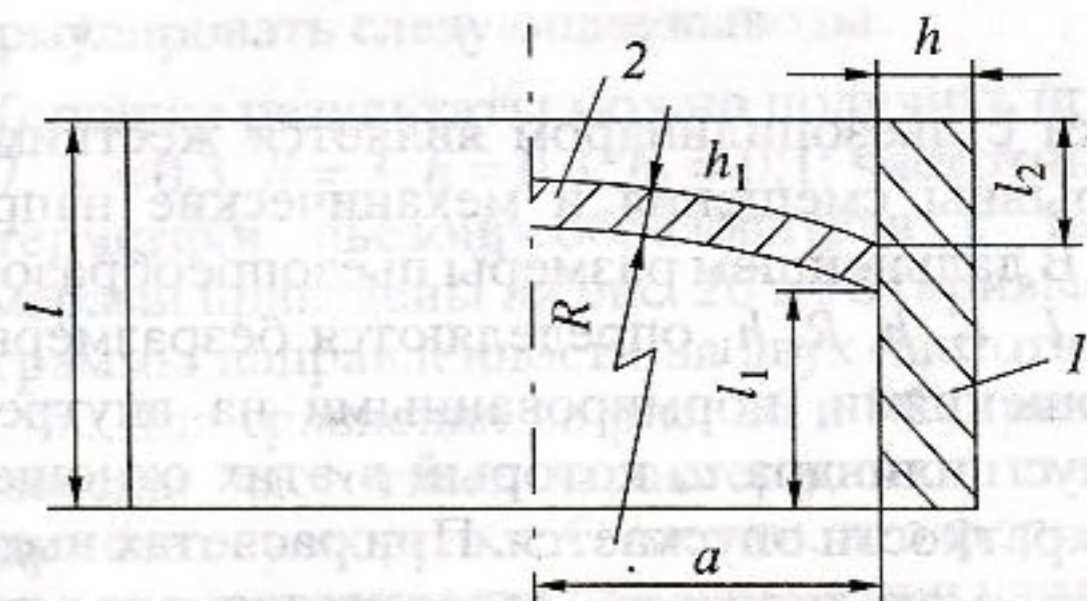
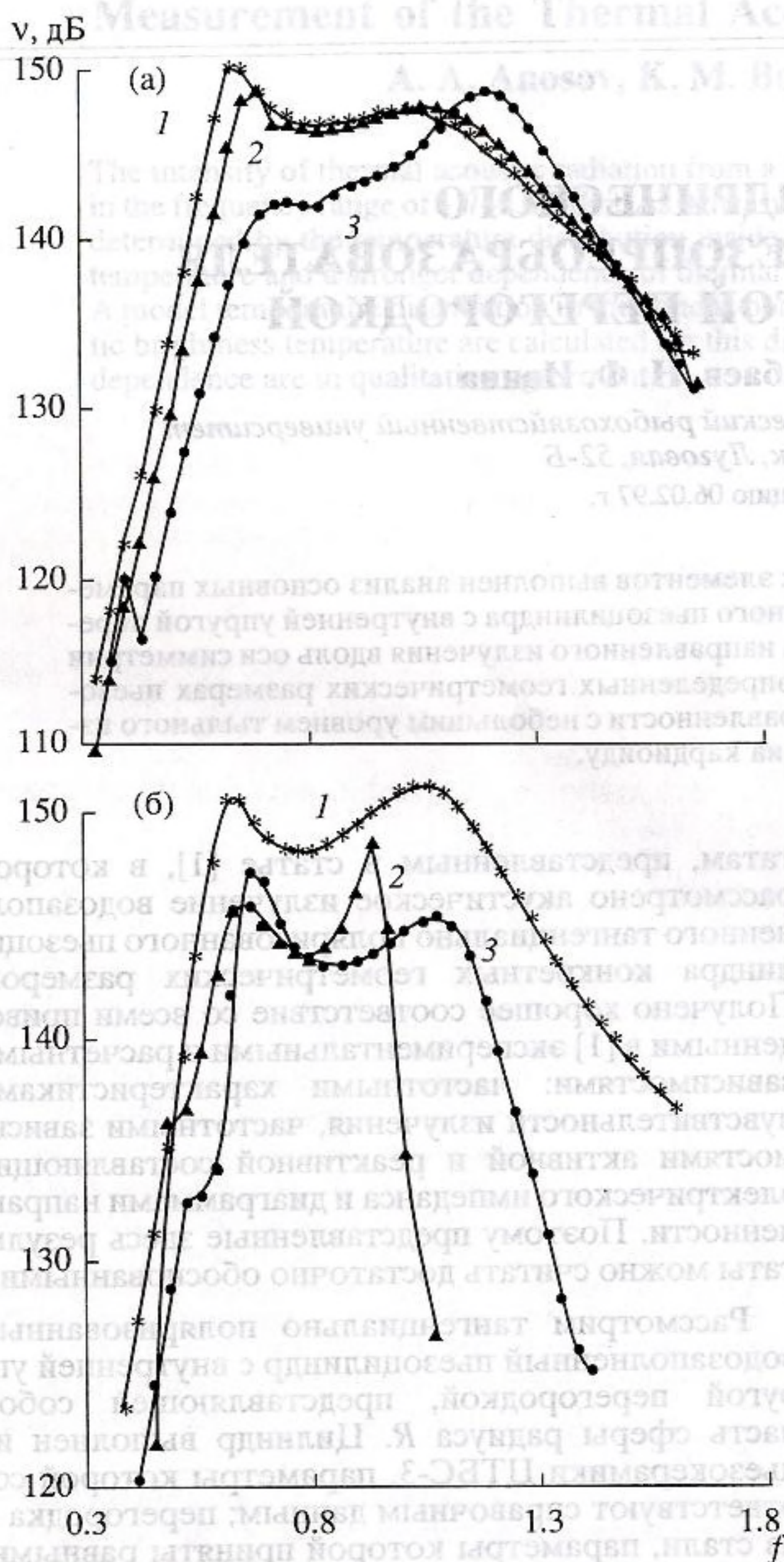


Рис. 1. Расчетная схема: 1 — пьезокерамический цилиндр; 2 — упругая сферическая перегородка.



**Рис. 2.** Частотные характеристики чувствительности излучения: а –  $h = 0.2$ ; 1 –  $l = 1.01$ ; 2, 3 –  $l_1 = l_2 = 0.5$ ; 2 –  $R = 10, h_1 = 0.01$ ; 3 –  $R = 5, h_1 = 0.1$ ; б –  $h = 0.3$ ; 1 –  $l = 1.2$ ; 2 –  $l_1 = 0.7, l_2 = 0.3, R = 3, h_1 = 0.1$ ; 3 –  $l_1 = 0.2, l_2 = 0.8, R = 5, h_1 = 0.2$ .

родки с пьезоцилиндром является жестким: непрерывны смещения и механические напряжения. В дальнейшем размеры пьезопреобразователя  $l, l_1, l_2, h, R, h_1$  определяются безразмерными отношениями, нормированными на внутренний радиус цилиндра  $a$ , который в этих отношениях для краткости опускается. При расчетах пьезоцилиндр моделируется пьезоактивными прямоугольными кольцевыми конечными элементами второго порядка с восемью узлами, а упругая пе-

регородка – пассивными треугольными кольцевыми конечными элементами второго порядка с шестью узлами.

Для анализируемого пьезопреобразователя рассчитывались частотные характеристики чувствительности излучения  $v$  в точке дальнего поля на плоскости симметрии пьезоцилиндра (в дБ относительно уровня 1 мкПа/В при 1 м), а также нормированные диаграммы направленности в вертикальной плоскости. Так как чувствительность излучения является локальной характеристикой (то есть зависит от выбранной точки), рассчитывалась также интегральная характеристика – частотная зависимость безразмерной активной составляющей акустической мощности при электрическом напряжении, равном 1 В. Для сравнения с характеристиками анализируемого пьезопреобразователя приведены также соответствующие кривые для полого пьезоцилиндра без перегородки.

На рис. 2а (кривая 1) приведена частотная характеристика чувствительности излучения полого пьезоцилиндра общей высотой  $l = 1.01$  с толщиной стенки  $h = 0.2$ . По оси абсцисс здесь и далее отложена частота, нормированная на частоту радиального резонанса полого пьезоцилиндра в воздухе, – безразмерная частота  $f$ . На рис. 3а (кривая 1) представлена частотная характеристика безразмерной активной составляющей акустической мощности этого же пьезоцилиндра. Первый (низкочастотный) максимум на частотных характеристиках связан с резонансом системы пьезоцилиндр – внутренний объем жидкости – часть окружающей жидкости, второй максимум – с радиальным резонансом пьезоцилиндра. Немонотонность частотных характеристик водозаполненного пьезоцилиндра при  $f \approx 1.6$ , более заметная на рис. 3а, связана с изгибной по высоте цилиндра модой колебаний [5, 6]. Отметим, что безразмерные резонансные частоты и соответствующие значения динамического коэффициента электромеханической связи  $k$  пьезоцилиндра с указанными размерами в рассматриваемом частотном диапазоне в воздухе равны: первая (антисимметричная) мода  $f_1 = 0.985, k_1 = 0$ ; вторая (симметричная) мода  $f_2 = 1, k_2 = 0.608$ ; третья (изгибная) мода  $f_3 = 1.71, k_3 = 0.004$ . Заметим также, что здесь рассматривается секционированный пьезоцилиндр, состоящий из 60 призм (в статье [5] количество призм было равно 32). На рис. 4а приведены нормированные на максимальное давление диаграммы направленности этого же пьезоцилиндра в полярных координатах на двух частотах, соответствующих двум максимумам частотных характеристик; по координатным осям отложено безразмерное давление  $p$ .

На рис. 2а (кривая 2) приведена частотная характеристика чувствительности излучения пьезопреобразователя с весьма тонкой перегородкой и почти симметричной конструкцией ( $l_1 = l_2 = 0.5$ ,

$R = 10, h_1 = 0.01$ ), а на рис. 3а (кривая 2) – частотная характеристика безразмерной активной составляющей акустической мощности этого же пьезопреобразователя. Из сравнения кривых 1 и 2 на рис. 2а и 3а следует, что анализируемый пьезопреобразователь при тонкой симметрично расположенной перегородке малой кривизны сохраняет частотные характеристики с двумя максимумами, присущие обычному водозаполненному пьезоцилиндру и остается широкополосным гидроакустическим излучателем. Наличие тонкой перегородки приводит в этом случае к уменьшению акустической мощности, излучаемой на частоте объемного резонанса, и увеличению акустической мощности на частоте радиального резонанса; частоты этих резонансов немного повышаются по сравнению с соответственными резонансными частотами для полого пьезоцилиндра. Диаграммы направленности на частотах, соответствующих двум максимумам частотных характеристик, практически совпадают с диаграммами направленности полого пьезоцилиндра, представленными на рис. 4а (в масштабе рисунка их нельзя различить, и поэтому они не приводятся), небольшое отличие наблюдается только в осевом направлении.

Частотные характеристики пьезопреобразователя с более толстой перегородкой большей кривизны ( $h_1 = 0.1, R = 5$ ) представлены на рис. 2а и 3а (кривые 3), а его диаграммы направленности на трех частотах – на рис. 4б. Увеличение толщины перегородки приводит к значительному снижению чувствительности и акустической мощности на частоте объемного резонанса и к повышению этих величин на частоте радиального резонанса, которая при этом еще более увеличивается. Небольшой максимум на частотных характеристиках при  $f \approx 0.4$  связан с низкочастотными колебаниями упругой перегородки; на этой частоте формируется диаграмма направленности дипольного типа (в виде “восьмерки”). Отметим, что чувствительность излучения на оси преобразователя достигает 143 дБ, но этот эффект является узкополосным. Увеличение асимметрии преобразователя (в данном случае за счет уменьшения радиуса перегородки  $R$ ) и увеличение толщины перегородки приводит к тому, что диаграммы направленности на двух других частотах становятся несимметричными, причем увеличивается уровень осевого излучения. Значения  $f_i$  и  $k_i$  при этих размерах равны:  $f_1 = 0.56, k_1 = 0.207; f_2 = 1.01, k_2 = 0.044; f_3 = 1.25, k_3 = 0.465$ .

Большой практический интерес представляет исследование возможности формирования направленного излучения вдоль оси симметрии такого пьезопреобразователя при небольшом уровне тыльного излучения; очевидно, что этого можно достичь только при несимметричной конструкции. После проведения расчетов при различных геоме-

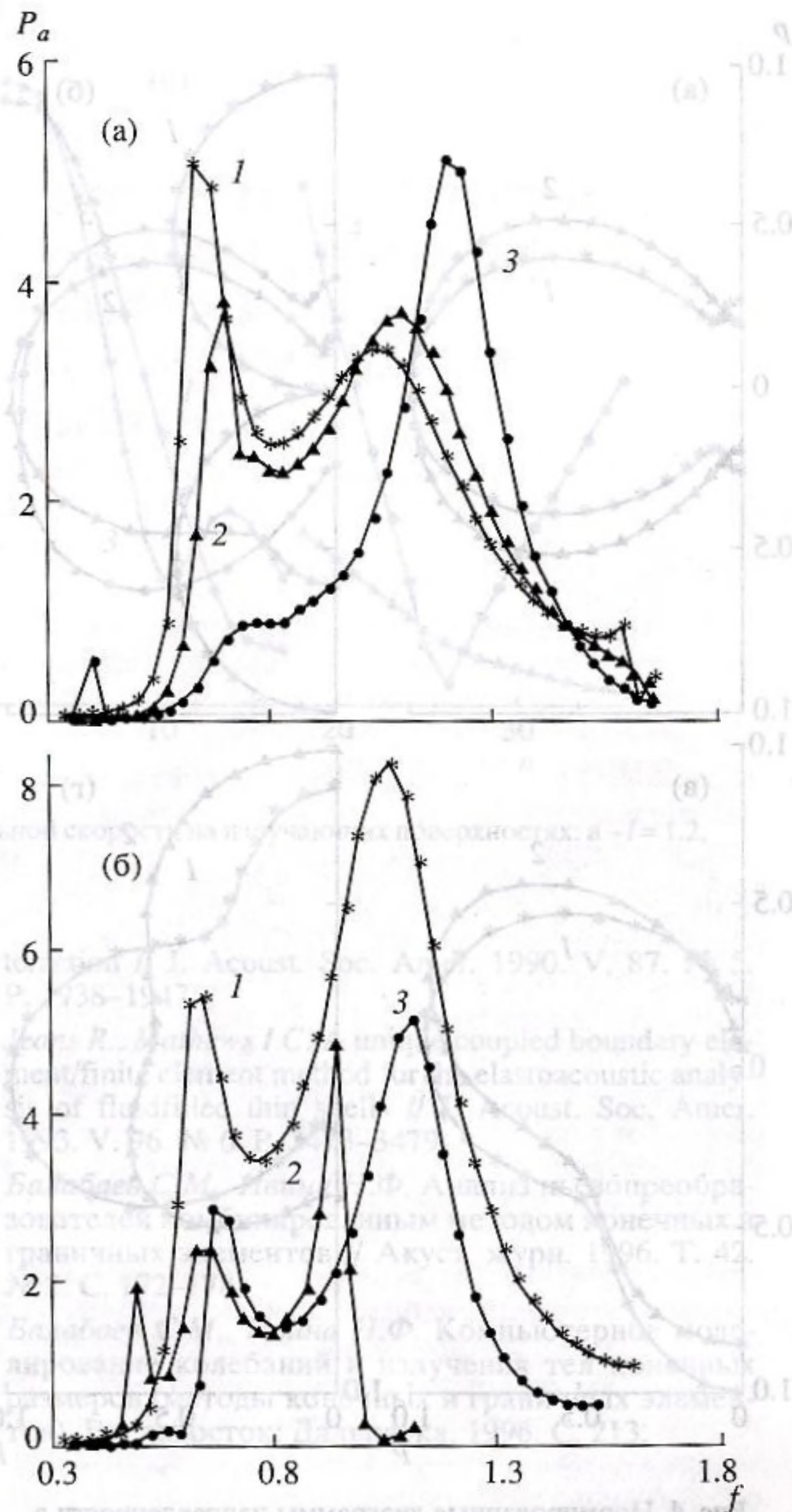


Рис. 3. Частотные характеристики безразмерной активной составляющей акустической мощности (размеры – см. подписи к рис. 2).

трических размерах пьезопреобразователя можно сформулировать следующие выводы.

Хорошие результаты можно получить при  $l_1 = 0.7, l_2 = 0.3, R = 3, h = 0.3, h_1 = 0.1$ ; частотные характеристики пьезопреобразователя с такими размерами приведены на рис. 2б и 3б (кривые 2), а диаграммы направленности на двух частотах – на рис. 4в. Для сравнения на рис. 2б и 3б (кривые 1) приведены частотные характеристики пьезоцилиндра без перегородки. Отметим, что форма диаграммы направленности при изменении частоты в основном сохраняется; она немного похожа на кардиоиду, что может быть необходимо для специ-

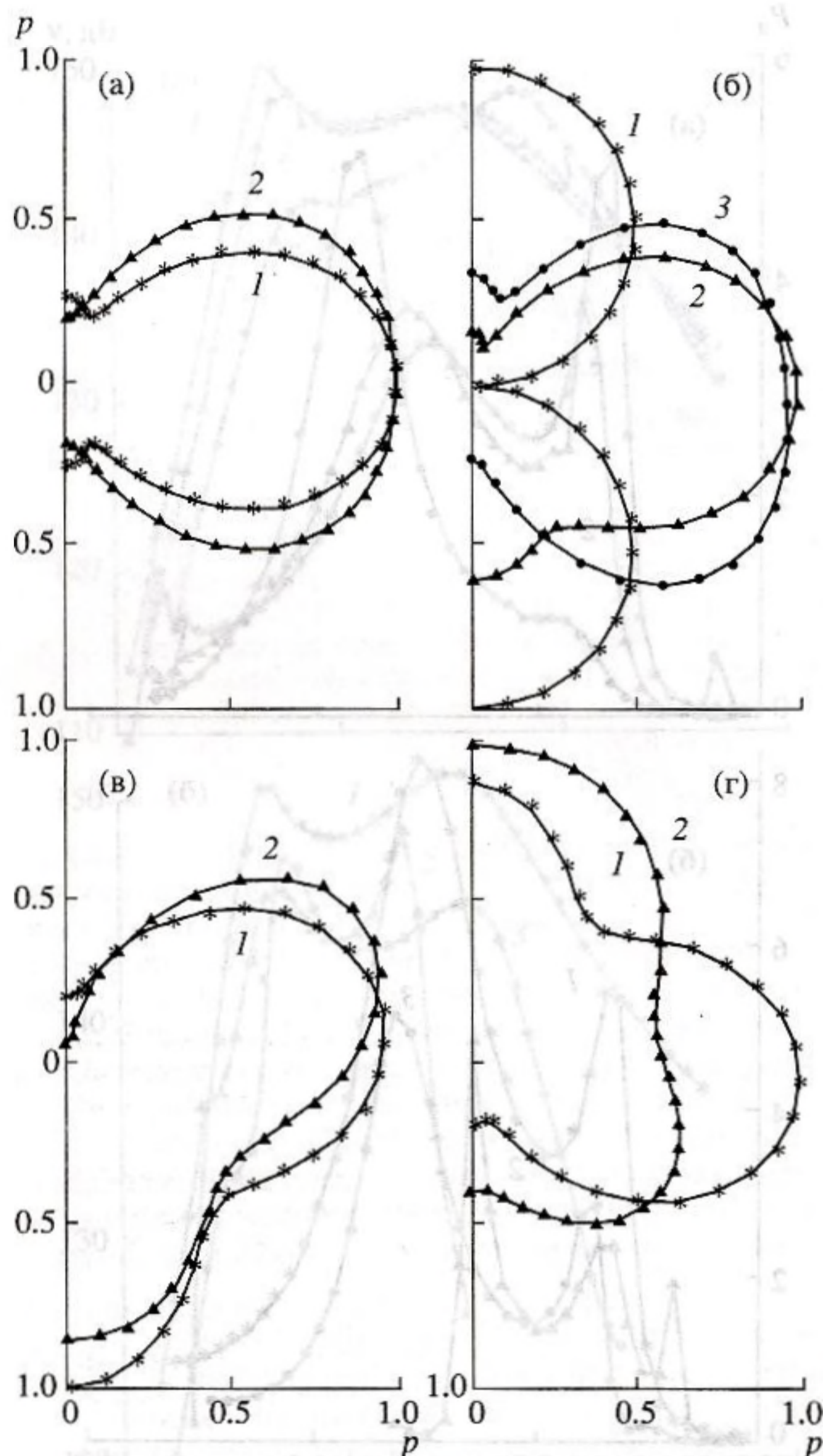


Рис. 4. Нормированные диаграммы направленности в вертикальной плоскости: а —  $l = 1.01, h = 0.2; 1 - f = 0.63; 2 - f = 1.05$ ; б —  $l_1 = l_2 = 0.5, R = 5, h = 0.2, h_1 = 0.1; 1 - f = 0.4; 2 - f = 0.73; 3 - f = 1.2$ ; в —  $l_1 = 0.7, l_2 = 0.3, R = 3, h = 0.3, h_1 = 0.1; 1 - f = 0.65; 2 - f = 0.95$ ; г —  $l_1 = 0.2, l_2 = 0.8, R = 5, h = 0.3, h_1 = 0.2; 1 - f = 0.65; 2 - f = 1.05$ .

альных гидроакустических устройств, например, донных маяков-ответчиков навигационных систем. Уровень излучения в сторону вогнутости оболочки достигает 0.86–1 от максимального, а в сторону выпуклости оболочки составляет менее 0.2 от максимального. Значения  $f_i$  и  $k_i$  при этих размерах:  $f_1 = 0.71, k_1 = 0.370, f_2 = 0.99, k_2 = 0.296, f_3 = 1.50, k_3 = 0.349$ . Наличие толстой несимметрично расположенной перегородки приводит к уменьшению акустической мощности и рабочей полосы частот пьезопреобразователя по сравнению с по-

лым пьезоцилиндром, но позволяет получить диаграмму направленности указанного вида.

Необходимо также отметить, что формы колебаний пьезоцилиндра при наличии толстой несимметрично расположенной перегородки значительно отличаются от форм колебаний полого пьезоцилиндра. На рис. 5а приведены типичные распределения модуля безразмерной нормальной компоненты колебательной скорости на внешней (кривые 1, 3) и внутренней (кривые 2, 4) поверхностях полого пьезоцилиндра на частоте объемного (кривые 1, 2) и радиального (кривые 3, 4) резонансов. По оси абсцисс отложены номера узловых точек на цилиндрических поверхностях (нижние угловые точки — 1 и 14, точки на плоскости симметрии пьезоцилиндра — 7 и 20, верхние угловые точки — 13 и 26). Естественно, что радиальный резонанс формируется симметричной модой пьезоцилиндра, близкая по частоте антисимметричная мода практически не возбуждается в пьезоцилиндре со сплошными электродами.

Типичные распределения модуля безразмерной нормальной компоненты колебательной скорости на перегородке (кривые 1, 3) и внешней цилиндрической поверхности (кривые 2, 4) представлены на рис. 5б для двух частот, соответствующих первому (низкочастотному) максимуму (кривые 1, 2) и второму максимуму (кривые 3, 4) частотных характеристик. По оси абсцисс отложены номера узловых точек: первые семнадцать точек соответствуют перегородке (1 — на оси симметрии, 17 — в месте контакта с пьезоцилиндром), последующие 19 точек расположены на внешней цилиндрической поверхности снизу вверх, причем девятая точка ( $n = 26$ ) находится на расстоянии  $l_1$  от нижнего торца цилиндра. Из рис. 5б следует, что из-за асимметрии конструкции пьезоцилиндр колеблется на антисимметричной моде. Поэтому очевидно, что подобная конструкция механически менее прочна, чем обычный водозаполненный пьезоцилиндр, особенно на частоте радиального резонанса.

Большой уровень осевого излучения можно получить и в сторону выпуклости оболочки при  $l_1 = 0.2, l_2 = 0.8, R = 5, h = 0.3, h_1 = 0.2$ ; соответствующие частотные характеристики приведены на рис. 2б и 3б (кривые 3), а диаграммы направленности на двух частотах — на рис. 4г. В этом случае полоса частот шире, чем в предыдущем, однако форма диаграммы направленности значительно изменяется с частотой. Значения  $f_i$  и  $k_i$  при этих размерах равны:  $f_1 = 0.73, k_1 = 0.167, f_2 = 1.08, k_2 = 0.456, f_3 = 1.83, k_3 = 0.158$ .

Следовательно, такая асимметричная конструкция позволяет сформировать направленное излучение в достаточно широкой полосе частот, причем получаемый эффект устойчив при небольшом изменении геометрических размеров

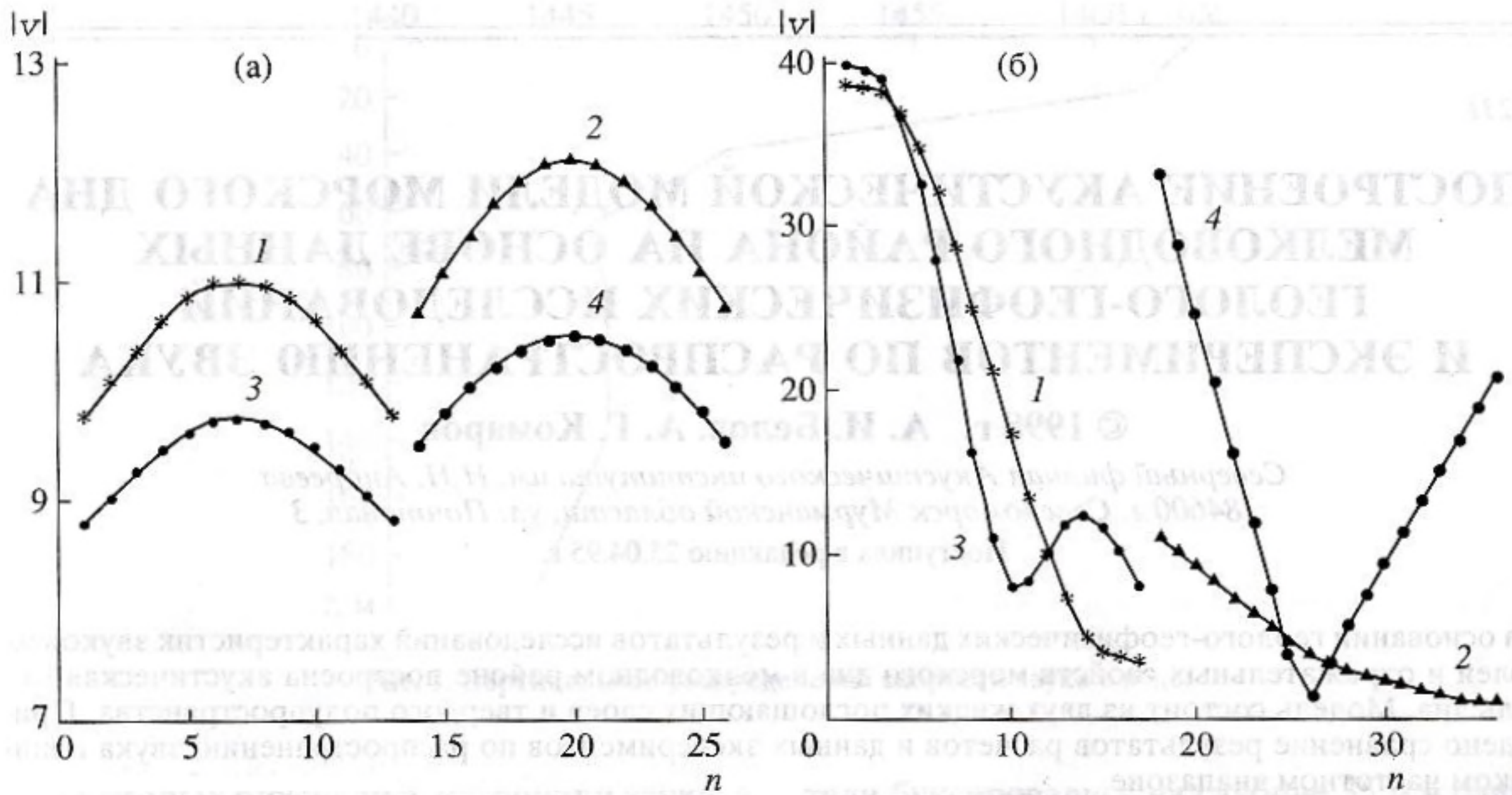


Рис. 5. Распределения модуля нормальной компоненты колебательной скорости на излучающих поверхностях: а -  $l = 1.2$ ,  $h = 0.3$ ; б -  $l_1 = 0.7$ ,  $l_2 = 0.3$ ,  $R = 3$ ,  $h = 0.3$ ,  $h_1 = 0.1$ .

(или, соответственно, параметров материалов) пьезопреобразователя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smith R.R., Hunt J.T., Barach D. Finite element analysis of acoustically radiating structures with applications to sonar transducers // J. Acoust. Soc. Amer. 1973. V. 54. № 5. P. 1277-1288.
2. Bossut R., Decarpigny J.-N. Finite element modeling of radiating structures using dipolar damping elements // J. Acoust. Soc. Amer. 1989. V. 86. № 4. P. 1234-1244.
3. Everstine G.C., Henderson F.M. Coupled finite element/boundary element approach for fluid-structure in-

teraction // J. Acoust. Soc. Amer. 1990. V. 87. № 5. P. 1938-1947.

4. Jeans R., Mathews I.C. A unique coupled boundary element/finite element method for the elastoacoustic analysis of fluidfilled thin shells // J. Acoust. Soc. Amer. 1993. V. 96. № 6. P. 3473-3479.
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. С. 213.

Analysis of a Cylindrical Water-Filled Piezoelectric Transducer with an Internal Elastic Partition

S. M. Balabaev and N. F. Ivina

A water-filled tangentially polarized piezoelectric cylinder with an internal elastic partition wall is analyzed by a hybrid method of finite and boundary elements. The possibility to form a directed beam along the axis of symmetry of such a piezoelectric transducer is investigated. It is demonstrated that, with certain geometric parameters, the transducer has a directivity pattern with only a small backlobe. The axial section of this radiation is similar to a cardioid.