АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXIX 1983 Вып. 1

УДК 534.232.73

К ОЦЕНКЕ ШИРОКОПОЛОСНОСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Касаткин Б. А., Матвиенко Ю. В.

Для расширения полосы пропускания низкочастотных цилиндрических пьезопреобразователей, совершающих радиальные колебания, предложены цилиндрические согласующие слои переменной высоты. Приведены результаты численных расчетов.

Исследования возможностей расширения полосы пропускания цилиндрических пьезопреобразователей, проведенные в работах [1—3], показали, что значительное расширение полосы пропускания достигается при уменьшении относительной толщины стенки цилиндрического пьезоэлемента или при согласовании волновых сопротивлений пьезопреобразователя и нагрузки согласующими слоями. В этих работах удельной акустический импеданс нагрузки определен для бесконечно протяженного цилиндрического источника и соответственно полученные оценки широкополосности справедливы для цилиндрических пьезопреобразователей, волновая длина которых достаточно велика. Для низкочастотных цилиндрических пьезопреобразователей, работающих в области частот ниже частоты основного резонанса, а также для резонансных цилиндрических преобразователей, длина которых мала в сравнении с радиусом, необходим учет дифракции звука на цилиндре конечной длины, так как в этих случаях волновая длина преобразователя не является достаточно большой. Учет дифракции в расчетной схеме работы [4] влияет на все характеристики цилиндрического преобразователя.

Ниже анализируется влияние дифракции на широкополосность низкочастотных цилиндрических пьезопреобразователей, геометрические размеры которых соизмеримы.

Рассмотрим цилиндрический излучатель, состоящий из активного пьезоэлемента и переходного слоя, который для увеличения акустической нагруженности выполнен в виде цилиндрического слоя переменной высоты (фиг. 1, *а*). Пусть активный элемент имеет средний радиус a_0, толщину стенки — $2h$, высоту — $2l_0$. Геометрию переходного слоя зададим радиусом излучателя a_1 и законом изменения высоты $l(r)$, причем $l(a_0+h)=l_0$, $l(a_1)=l_1$.

Напишем выражение для излучаемой акустической мощности в виде

$$P_{\text{А}}={}^1/_2\,|U_{\text{П}}|^2\,\mathrm{Re}\,Y_{\text{П}}, \tag{1}$$

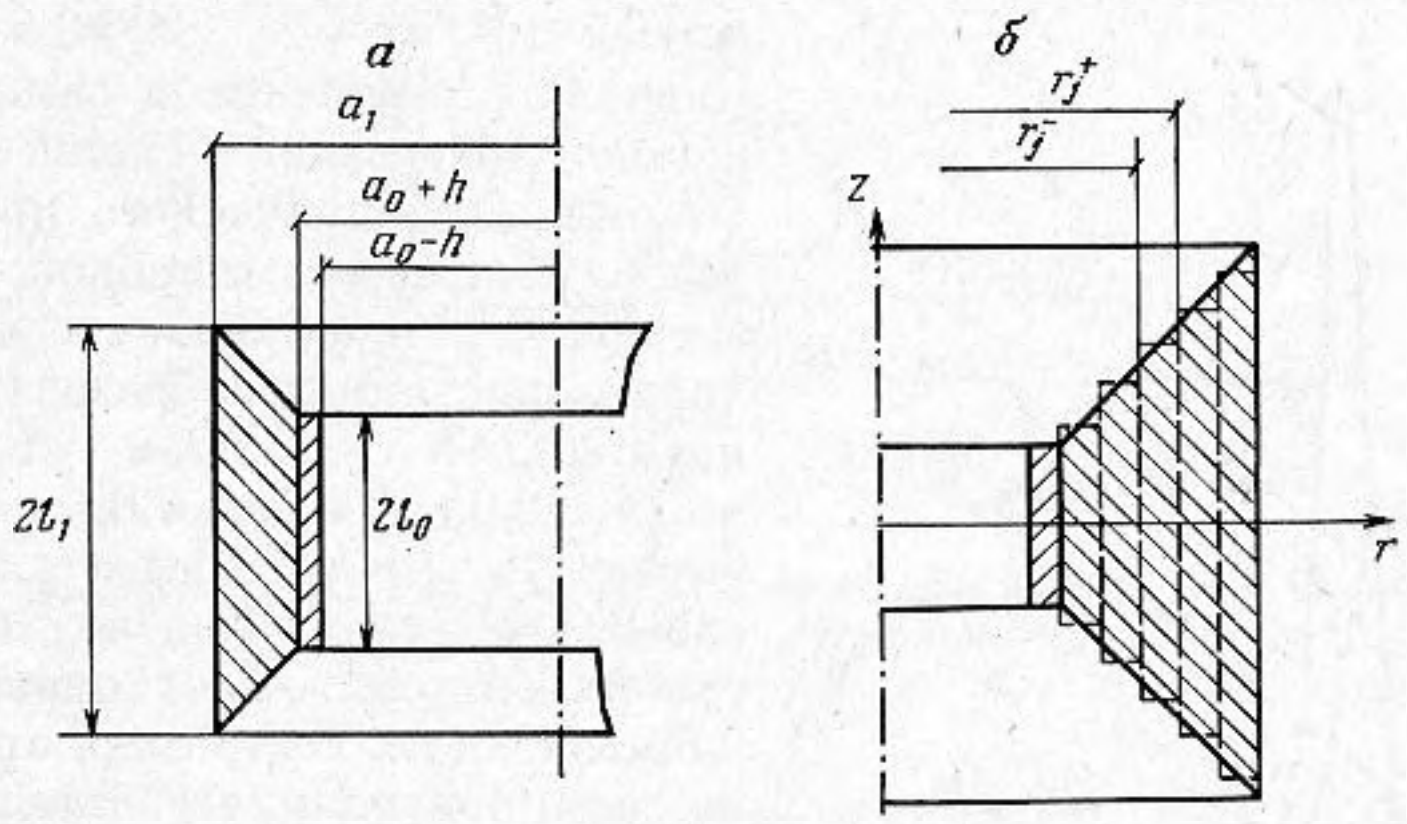
где $U_{\text{П}}$ — электрическое напряжение на излучателе, $Y_{\text{П}}$ — входной электрический адмитанс излучателя. Электрический адмитанс произвольно нагруженного с акустической стороны цилиндрического пьезопреобразователя получен нами в работе [5] и является функцией удельной акустической нагрузки, определенной на поверхности $r=a_0+h$, $|z|\leqslant l_0$. Задача расчета описанного излучателя состоит в определении импеданса излучения на внешней поверхности излучателя и трансформации его к поверхности активного элемента.

Напишем сначала импеданс излучения цилиндрического пульсирующего источника конечной высоты в виде

$$Z_{\text{И}}=\rho c S_{\text{И}} z_R, \tag{2}$$

где ρ, c — плотность и скорость звука в рабочей среде, $S_{\text{И}}=2\pi a_1 2l_1$ — площадь излучателя, z_R — дифракционный множитель для цилиндра конечной

высоты. Согласно работе [6], z_R для произвольного значения параметра $L_1=l_1/a_1$ может быть определено в различных приближениях и повышение точности вычисления z_R сопровождается усложнением расчетных схем. Для расчета основных колебательных характеристик цилиндрических пьезопреобразователей, высота которых меньше диаметра, при вычислении z_R может быть использована замена цилиндрического источника эквивалентным — сферическим. Такая замена обеспечивает хорошую точность в области низких частот [6], а сопротивление излучения записывается в удоб-



Фиг. 1. Пояснения к расчетной схеме: *а* — постановка задачи; *б* — аппроксимация излучателя

ной аналитической форме. Нами сопротивление излучения определено для сферического слоя, высотой $l_2=a_2\cos\theta_0$ пульсирующего на жесткой сфере радиуса $a_2=a_1(1+L_1^2)^{1/4}$, где $\theta_0=\mathrm{arctg}\,(1/L_1)$ и написано в виде

$$z_R=\frac{i}{\pi}\sum_m\frac{[P_{m+1}(y)-P_{m-1}(y)]^2}{2m+1}\cdot\frac{h_m^{(2)}(x)h_m^{(1)}(x)}{|h_m'(x)|^2}. \qquad (3)$$

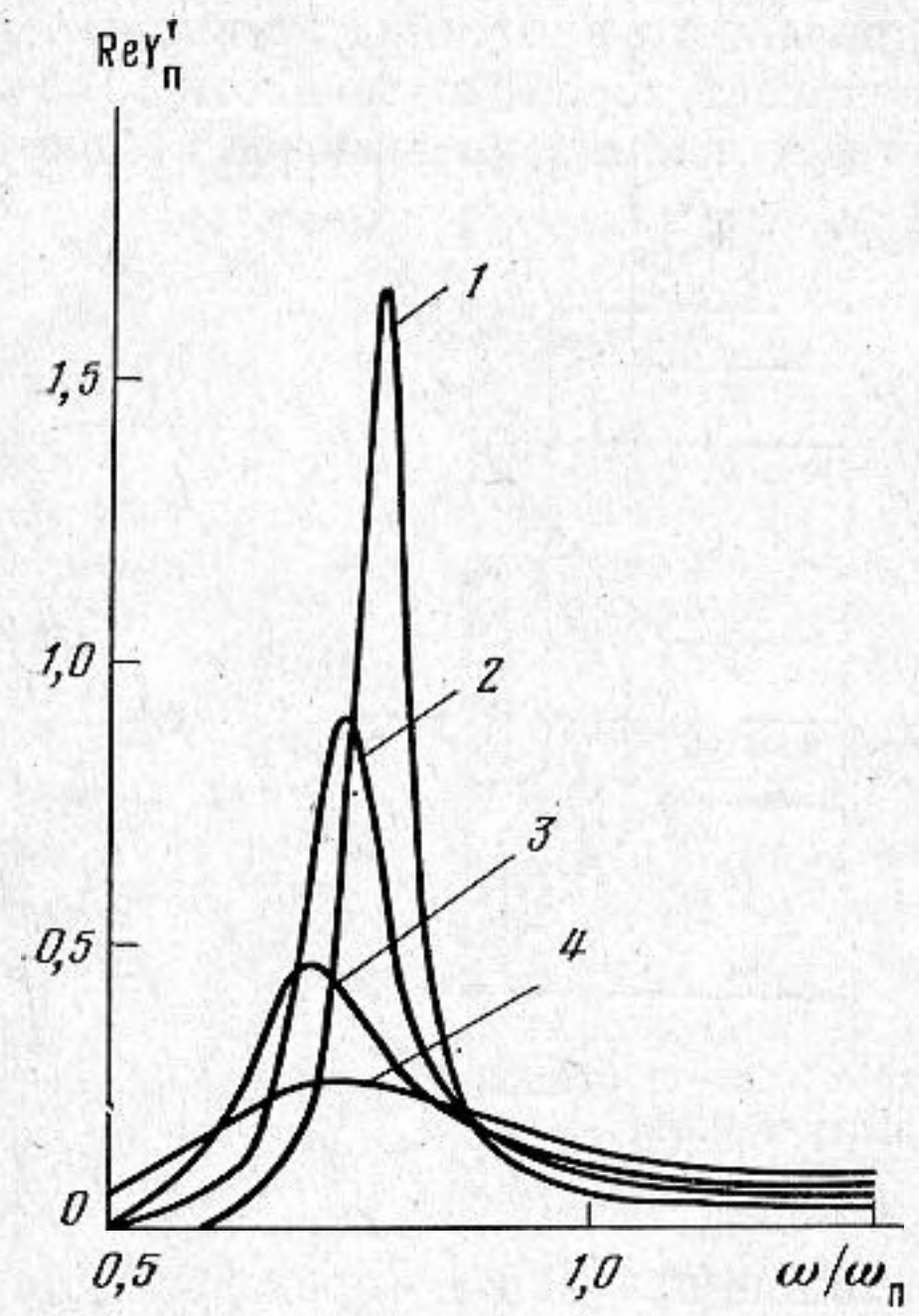
где $y=\cos\theta_0$, $x=ka_2$, $k=\omega/c$, $m=0, 2, 4\ldots$; $h_m'(x)=dh_m/dx$; $P_m(y)$ — полиномы Лежандра, $h_m(x)$ — сферические функции Бесселя.

На следующем этапе решения задачи получим входной импеданс согласующего слоя переменной высоты. Для этого напишем удельный входной импеданс цилиндрического слоя постоянной высоты, ограниченного радиусами r_j^-, r_j^+, нагруженного внешней поверхностью на удельный импеданс z_j^+, в виде, несколько отличном от приведенного в работе [7]

$$z_j^-=-i\rho_2c_2\Delta_0(J_1^-a_{22}-N_1^-a_{21})^{-1}; \qquad (4)$$

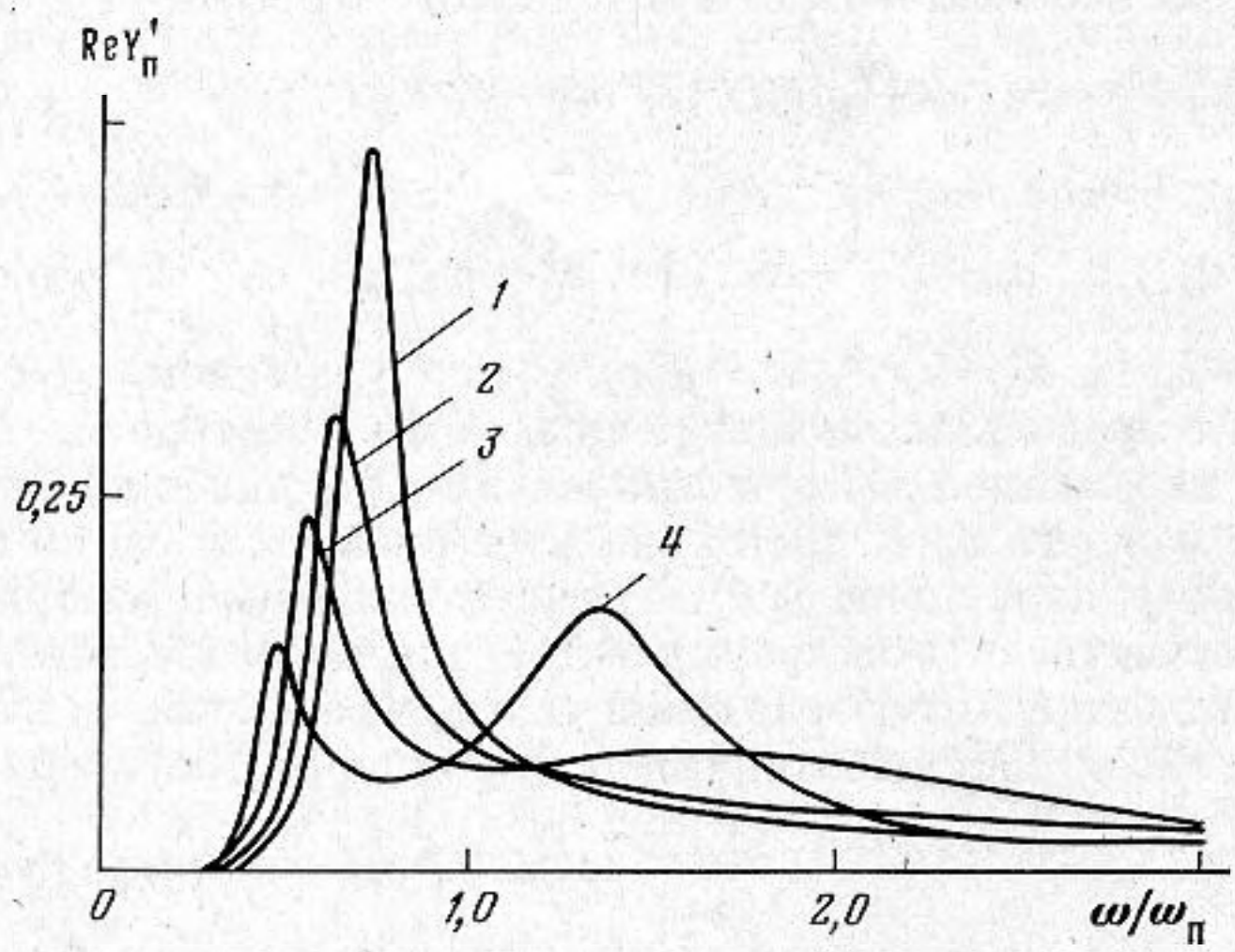
где $\Delta_0=a_{11}a_{22}-a_{12}a_{21}$, $a_{11}=J_0^--2\nu^2J_1^-/x^-$, $a_{12}=N_0^--2\nu^2N_1^-/x^-$, $a_{21}=J_0^+-J_1^+(2\nu^2/x^+-i\alpha_j^+)$, $a_{22}=N_0^+-N_1^+(2\nu^2/x^+-i\alpha_j^+)$, $\alpha_j^+=z_j^+/(\rho_2c_2)$, $F_n^\pm=F_{0,1}(x^\pm)$; $F=I$, N, $x^\pm=k_2r_j^\pm$, $k_2=\psi/c_2$, $\nu^2=c_t/c_2$, причем ρ_2, c_2, c_t — плотность, скорости продольных и поперечных волн в материале слоя. Согласующий слой переменной высоты аппроксимируем набором из m тонких слоев. Высота каждого слоя постоянна и изменяется в соответствии с законом раскрыва рупора (фиг. 1, *б*). Тогда входной импеданс согласующей системы можно вычислить по формуле (4) при последовательном изменении j от m к 1, причем для обеспечения условия равенства сил на границах элементарных слоев [8], необходимо в формуле (4) осуществить замену $\alpha_j^+=\alpha_j^+\dfrac{S_j}{S_{j-1}}$ с учетом того, что $\alpha_m^+=Z_и/(\rho_2c_2S_и)$, $S_m=S_и$, $S_0=2\pi(a_0+h)2l_0$; $\alpha_1^-=z_1^-/(\rho_1c_1)$, где ρ_1, c_1 — плотность и скорость звука в пьезокерамике. Полученное выражение подставим в формулу для входного электрического адмитанса излучателя $Y_п$.

В качестве расчетной величины возьмем $\mathrm{Re}\, Y_п' = \mathrm{Re}\, Y_п/(\omega_п C_п)$, имеющую смысл удельной излучаемой акустической мощности (1). В последнем выражении для нормировки используются: $\omega_п = c_1/a_0$ — антирезонансная частота, $C_п$ — электрическая емкость заторможенного активного элемента.

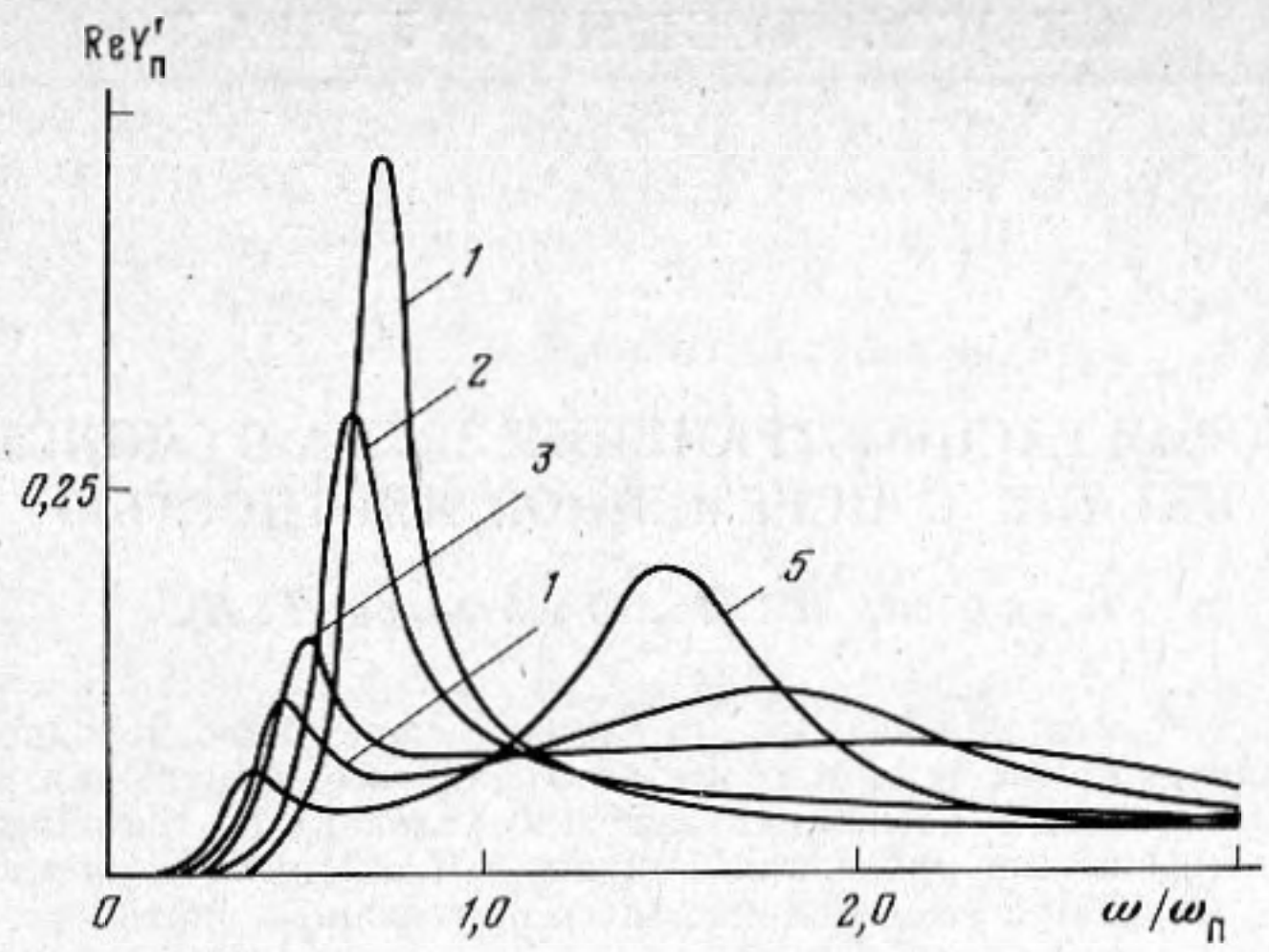


Фиг. 2. Частотные характеристики удельной акустической мощности цилиндрических пьезопреобразователей различной высоты: *1* – $L=0{,}1$; *2* – $L=0{,}2$; *3* – $L=0{,}5$; *4* – $L=\infty$; для $H=0{,}05$

Расчеты выполнены для пьезокерамики типа ЦТС-19, нагруженной на воду через согласующий слой из пластика ЭДС-7А, имеющего параметры $\rho_2=0{,}7\cdot10^3$ кг/м^3; $c_2=2{,}5\cdot10^3$ м/с. Сначала рассмотрим в рамках изложенной расчетной схемы влияние высоты цилиндрического пьезопреобразователя на его широкополосность. На фиг. 2 представлены частотные характеристики преобразователя с относительной толщиной стенки $H=h/a_0=0{,}05$ для различных значений параметра $L=l_0/a_0$ без согласующих слоев. Очевидно, что учет дифракции существенно изменяет оценки широкополосности. Например, при $L=0{,}5$ полоса пропускания составляет 20%, а для $L=\infty$ (без учета дифракции) — 45%. Рассмотрим теперь результаты численных расчетов цилиндрических пьезопреобразователей, нагруженных на воду через согласующие слои. Зададим геометрию активного пьезоэлемента параметрами $H=0{,}05$; $L=0{,}5$. На фиг. 3 показаны частотные характеристики излучателя с согласующим цилиндрическим слоем постоянной высоты, а на фиг. 4 — частотные характеристики излучателя с согласующим слоем линейно возрастающей высоты: $l(r)=l_0+r-(a_0+h)$, $l(a_1)=l_0+\Delta R$. Параметр кривых на фиг. 3, 4 — толщина слоя $\Delta R=a_1-(a_0+h)$. Сравнивая согласующие свойства переходных слоев, представленных на фиг. 3, 4, можно отметить, что вследствие рупорных свойств цилиндрического слоя переменной высоты (фиг. 4) увеличивается акустическая нагруженность и существенно расширяется полоса пропускания, достигающая при $\Delta R=0{,}3$ трех октав, понижается нижняя



Фиг. 3. Частотные характеристики удельной акустической мощности цилиндрических преобразователей с согласующим слоем постоянной высоты: *1* – $\Delta R=0$; *2* – $\Delta R=0{,}2$; *3* – $\Delta R=0{,}4$; *4* – $\Delta R=0{,}7$



Фиг. 4. Частотные характеристики удельной акустической мощности цилиндрических преобразователей с цилиндрическим слоем переменной высоты: *1* – $\Delta R=0$; *2* – $\Delta R=0{,}1$; *3* – $\Delta R=0{,}3$; *4* – $\Delta R=0{,}4$; *5* – $\Delta R=0{,}6$

частота рабочего диапазона при незначительном (30%) увеличении радиальных размеров. Оптимальные, в смысле максимума полосы пропускания, толщины согласующих слоев переменной высоты оказываются вдвое меньшими по сравнению с оптимальными четвертьволновыми согласующими слоями, а расширение частотного диапазона преобразователя в этом случае определяется размягчением акустически жесткого цилиндрического пьезоэлемента мягким слоем и усреднением физических характеристик излучателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дианов Д. Б., Кузьменко А. Г.* Исследование возможностей расширения полосы пропускания цилиндрических пьезокерамических преобразователей.– Акуст. ж., 1970, т. 16, № 2, с. 236–240.
2. *Дианов Д. Б., Задириенко И М.* К вопросу о расширении полосы пропускания цилиндрических пьезокерамических преобразователей.– Акуст. ж., 1975, т. 21, № 3, с. 408–409.
3. *Алексеев Б. Н.* Расширение полосы пропускания цилиндрического пьезокерамического преобразователя при помощи двух переходных слоев.– Акуст. ж., 1976, т. 22, № 2, с. 179–184.
4. *Дианов Д. Б., Кузьменко А. Г.* Расчет цилиндрического пьезокерамического преобразователя, совершающего радиально-симметричные колебания.– Акуст. ж., 1970, т. 16, № 1, с. 42–48.
5. *Касаткин Б. А., Матвиенко Ю. В.* Спектр собственных частот цилиндрического пьезопреобразователя.– Акуст. ж., 1979, т. 25, № 6, с. 932–935.
6. *Козырев В. А., Шендеров Е. Л.* О сопротивлении излучения цилиндра конечной высоты.– Акуст. ж., 1980, т. 26, № 3, с. 422–432.
7. *Дианов Д. Б., Кузьменко А. Г.* Расчет входного акустического сопротивления и коэффициента передачи по мощности цилиндрического слоя, нагруженного на жидкую среду, с учетом потерь.– Изв. ЛЭТИ, 1972, вып. 112, с. 3–6.
8. *Васильев П. Е., Савицкас И. А.* Расчет кольцевых концентраторов радиальных колебаний.– Акуст. ж., 1979, т. 25, № 2, с. 208–212.

Научно-производственное
объединение «Дальстандарт»

Поступила в редакцию
1.VII.1981