АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том V 1959 Вып. 1

МОЗАИЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИЗ КЕРАМИКИ ТИТАНАТА БАРИЯ НА УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ЧАСТОТЫ

А. А. Ананьева

Дано описание конструкции простого одностороннего преобразователя из поляризованной керамики титаната бария и приведены данные чувствительности преобразователя в режиме приема и в режиме излучения в диапазоне частот от 40 до 250 *кгц*.

Экспериментально полученная частотная характеристика преобразователя сопоставлена с одномерным расчетом прозрачности многослойной системы, эквивалентной многослойной конструкции данного преобразователя.

Для лабораторных измерений часто полезно иметь односторонний преобразователь, работающий на фиксированных частотах в широком интервале частот. Подходящим для такого преобразователя материалом является керамика титаната бария, как материал сравнительно дешевый и обладающий достаточно высоким значением коэффициента электромеханической связи.

Возможно осуществить многорезонансный преобразователь, применив многослойную систему из различных материалов между активным пьезоэлектрическим материалом и той средой, в которой работает преобразователь.

Один из используемых в Акустическом институте АН СССР преобразователей — односторонний преобразователь из керамики титаната бария — конструктивно показан на фиг. 1.

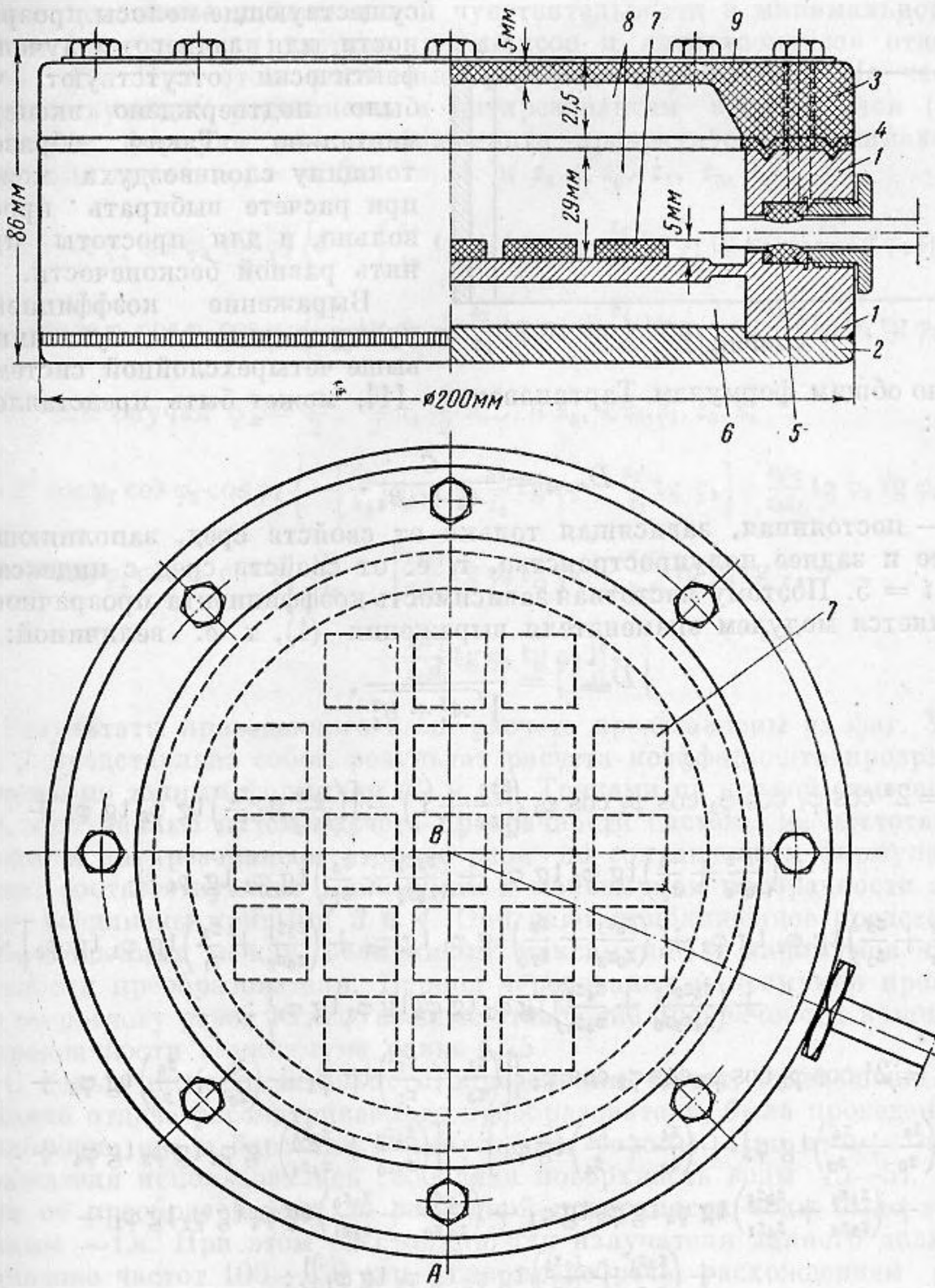
На круглой стальной пластине, толщиной 6 *мм*, являющейся частью цилиндрического кожуха 1, наклеены в виде мозаики карбинольным клеем керамические пластины 7, размером 20 × 20 × 5 *мм*. Общее число пластин равняется 21; все они соединены электрически параллельно и общая емкость преобразователя составляет $16 \cdot 10^3$ *pF*. С передней стороны корпус закрывается звукопрозрачной плексигласовой крышкой *3*, с резиновым уплотнением *4*. Прижим плексигласовой крышки с помощью стального кольца *9* и болтов позволяет получить надежную герметизацию внутренней полости *8*, которая заполняется трансформаторным маслом. Задняя крышка *2* приварена к корпусу *1*, так что между стальной пластиной, на которой наклеена керамика, и крышкой образуется полость *6*, заполненная воздухом. Ввод кабеля осуществляется через сальник *5*. Наличие воздушного объема *6* и обеспечивает одностороннюю направленность излучателя.

Легко видеть, что такой преобразователь в целом является многослойной системой, которая, естественно, обладает дискретным спектром собственных частот. На собственных частотах преобразователя отдача его в режиме излучения и чувствительность в режиме приема имеют максимальные значения. Спектр собственных частот преобразователя определяется числом переходных слоев, их толщинами и волновыми сопротивлениями.

Для определения спектра собственных частот многослойного преобразователя оказывается возможным воспользоваться частотной зависимостью коэффициента акустической прозрачности пассивной многослойной системы, конструктивно эквивалентной данному преобразователю.

Проведем расчет собственных частот, пренебрегая потерями в слоях и предполагая их бесконечно протяженными.

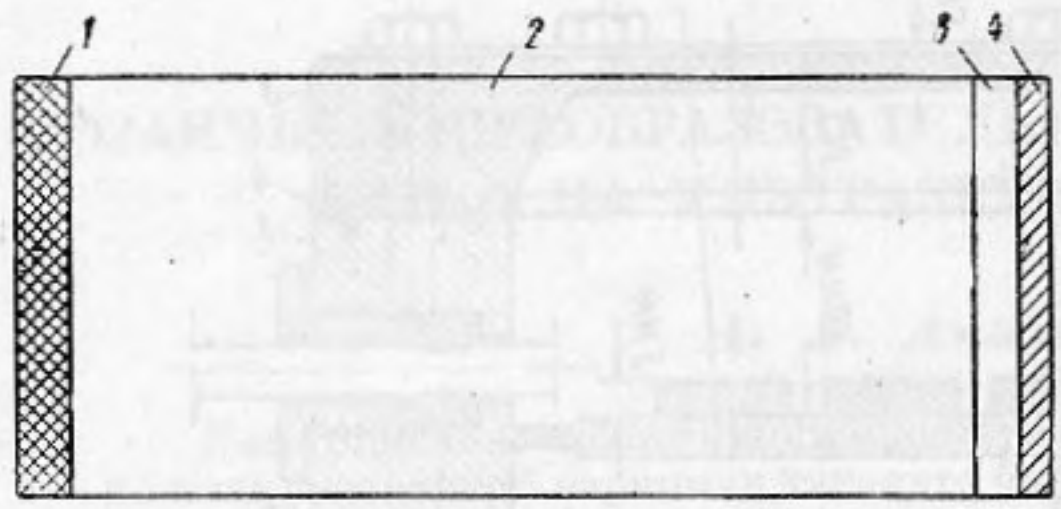
Система, эквивалентная данному преобразователю, состоит из восьми слоев (вода, плексиглас, масло, керамический титанат бария, сталь,



Фиг. 1

воздух, сталь, вода), причем водные слои являются полупространствами. Она может быть заменена системой из четырех слоев (плексиглас, масло, керамический титанат бария, сталь), помещенной между двумя полупространствами (водой и воздухом). Конечно, теоретически заднее излучение керамического слоя через систему сталь — воздух — сталь в в воду должно существовать на частотах, удовлетворяющих условию: $k_в l_в = \pi$, где $k_в$ — волновое число для воздушной среды и $l_в$ — толщина воздушного слоя. Однако волновое сопротивление воздуха настолько мало по сравнению с волновым сопротивлением стали, что относительная частотная полоса резонансных пиков прозрачности системы с воздушным

слоем $\frac{\Delta f}{f}$ имеет порядок 10^{-5}. Для того чтобы эти резонансные пики появились в реальной конструкции, необходимо, чтобы относительное изменение толщины воздушного слоя по всей поверхности было того же порядка, т. е. 10^{-5}, что практически не имеет места. Поэтому теоретически существующие полосы прозрачности для заднего излучения фактически отсутствуют, что было подтверждено экспериментально. Таким образом, толщину слоя воздуха можно при расчете выбирать произвольно, и для простоты принять равной бесконечности.



Фиг. 2

Выражение коэффициента прохождения для указанной выше четырехслойной системы, согласно общим формулам Тартаковского [1], может быть представлено в виде:

$$D_{n=4} = \frac{C}{A_4 + iB_4}, \tag{1}$$

где C — постоянная, зависящая только от свойств сред, заполняющих переднее и заднее полупространство, т. е. от свойств сред с индексами $i=0$ и $i=5$. Поэтому частотная зависимость коэффициента прозрачности определяется модулем знаменателя выражения (1), т. е. величиной:

$$|D_{n=4}^{*}| = \frac{1}{\sqrt{A_4^2 + B_4^2}}, \tag{2}$$

где

$$A_4 = 2^4 \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos\varphi_3 \cos\varphi_4 \left\{\left(\frac{z_5}{z_0} + 1\right) - \left[\left(\frac{z_5 z_3}{z_0 z_4} + \frac{z_4}{z_3}\right) \operatorname{tg}\varphi_3 \operatorname{tg}\varphi_4 + \right.\right.$$
$$+ \left(\frac{z_5 z_2}{z_0 z_4} + \frac{z_4}{z_2}\right) \operatorname{tg}\varphi_2 \operatorname{tg}\varphi_4 + \left(\frac{z_5 z_1}{z_0 z_4} + \frac{z_4}{z_1}\right) \operatorname{tg}\varphi_1 \operatorname{tg}\varphi_4 +$$
$$+ \left(\frac{z_5 z_2}{z_0 z_3} + \frac{z_3}{z_2}\right) \operatorname{tg}\varphi_2 \operatorname{tg}\varphi_3 + \left(\frac{z_5 z_1}{z_0 z_3} + \frac{z_3}{z_1}\right) \operatorname{tg}\varphi_1 \operatorname{tg}\varphi_3 + \left(\frac{z_5 z_1}{z_0 z_2} + \frac{z_2}{z_1}\right) \operatorname{tg}\varphi_1 \operatorname{tg}\varphi_2 \Big] +$$
$$\left. + \left(\frac{z_5 z_3 z_1}{z_4 z_2 z_0} + \frac{z_4 z_2}{z_3 z_1}\right) \operatorname{tg}\varphi_1 \operatorname{tg}\varphi_2 \operatorname{tg}\varphi_3 \operatorname{tg}\varphi_4 \right\}; \tag{3}$$

$$B_4 = 2^4 \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos\varphi_3 \cos\varphi_4 \left\{\left[\left(\frac{z_1}{z_0} + \frac{z_5}{z_1}\right) \operatorname{tg}\varphi_1 + \left(\frac{z_2}{z_0} + \frac{z_5}{z_2}\right) \operatorname{tg}\varphi_2 + \right.\right.$$
$$+ \left(\frac{z_3}{z_0} + \frac{z_5}{z_3}\right) \operatorname{tg}\varphi_3 + \left(\frac{z_4}{z_0} + \frac{z_5}{z_4}\right) \operatorname{tg}\varphi_4 \Big] - \left[\left(\frac{z_4 z_2}{z_3 z_0} + \frac{z_3 z_5}{z_4 z_2}\right) \operatorname{tg}\varphi_2 \operatorname{tg}\varphi_3 \operatorname{tg}\varphi_4 + \right.$$
$$+ \left(\frac{z_4 z_1}{z_3 z_0} + \frac{z_3 z_5}{z_4 z_1}\right) \operatorname{tg}\varphi_4 \operatorname{tg}\varphi_3 \operatorname{tg}\varphi_1 + \left(\frac{z_4}{z_2}\frac{z_1}{z_0} + \frac{z_2 z_5}{z_4 z_1}\right) \operatorname{tg}\varphi_4 \operatorname{tg}\varphi_2 \operatorname{tg}\varphi_1 +$$
$$\left. + \left(\frac{z_3 z_1}{z_2 z_0} + \frac{z_2 z_5}{z_3 z_1}\right) \operatorname{tg}\varphi_3 \operatorname{tg}\varphi_2 \operatorname{tg}\varphi_1 \Big]\right\}; \tag{4}$$

φ_1, φ_2, φ_3, φ_4 — волновые толщины соответствующих слоев ($i = 1$, $i = 2$, $i = 3$, $i = 4$); z_0, z_1, z_2, z_3, z_4 и z_5 — волновые сопротивления слоев и сред; $\varphi_i = 2\pi f \frac{l_i}{c_i}$ и $z_i = \rho_i c i$.

Если многослойную конструкцию преобразователя вычертить в масштабе волновых толщин, что при заданной частоте указывает на время прохождения звука через каждый слой, то легко определить, который из слоев в основном ответственен за положение максимумов.

На фиг. 2 в масштабе l_i/c_i представлена четырехслойная система, которая, согласно принятому упрощению, эквивалентна нашему преобразователю. Здесь *1* обозначает плексиглас, *2*— трансформаторное масло, *3*— керамический титанат бария, *4*— сталь. Легко видеть, что

в данной конструкции наибольшую волновую толщину имеет слой масла ($i = 2$); поэтому он в основном определяет частоты максимумов и минимумов чувствительности преобразователя.

Ввиду того, что формулы (3) и (4) довольно громоздки, можно приближенно оценить положение максимумов чувствительности преобразователя и отношение максимальной чувствительности к минимальной, применяя формулы для частных резонансов и антирезонансов отдельных слоев [2]. При этом расчетные формулы упрощаются. На частотах, соответствующих резонансам и антирезонансам второго слоя ($i = 2$), расчетные формулы для коэффициента прозрачности принимают вид:

1) для случая $\varphi_2 = \pi,\ 2\pi,\ 3\pi, \ldots$ и $z_5 \ll z_0,\ z_1,\ z_3,\ z_4$

$$A = 2^4 \cos\varphi_1 \cos\varphi_3 \cos\varphi_4 \left\{1 + \left[\frac{z_4}{z_3} \operatorname{tg}\varphi_3 \operatorname{tg}\varphi_4 + \frac{z_4}{z_1} \operatorname{tg}\varphi_1 \operatorname{tg}\varphi_4 + \frac{z_3}{z_1} \operatorname{tg}\varphi_1 \operatorname{tg}\varphi_3\right]\right\};$$

$$B = 2^4 \cos\varphi_1 \cos\varphi_3 \cos\varphi_4 \left\{\left[\frac{z_1}{z_0} \operatorname{tg}\varphi_1 + \frac{z_3}{z_0} \operatorname{tg}\varphi_3 + \frac{z_4}{z_0} \operatorname{tg}\varphi_4\right] - \frac{z_4 z_1}{z_3 z_0} \operatorname{tg}\varphi_4 \operatorname{tg}\varphi_3 \operatorname{tg}\varphi_1\right\};$$

2) для случая $\varphi_2 = \frac{\pi}{2},\ \frac{3}{2}\pi,\ \frac{5}{2}\pi, \ldots$ и $z_5, \ll z_0, z_1, z_3, z_4$

$$A = 2^4 \cos\varphi_1 \cos\varphi_3 \cos\varphi_4 \left\{-\left[\frac{z_4}{z_2} \operatorname{tg}\varphi_4 + \frac{z_3}{z_2} \operatorname{tg}\varphi_3 + \frac{z_2}{z_1} \operatorname{tg}\varphi_1\right] + \frac{z_4 z_2}{z_3 z_1} \operatorname{tg}\varphi_1 \operatorname{tg}\varphi_3 \operatorname{tg}\varphi_4\right\};$$

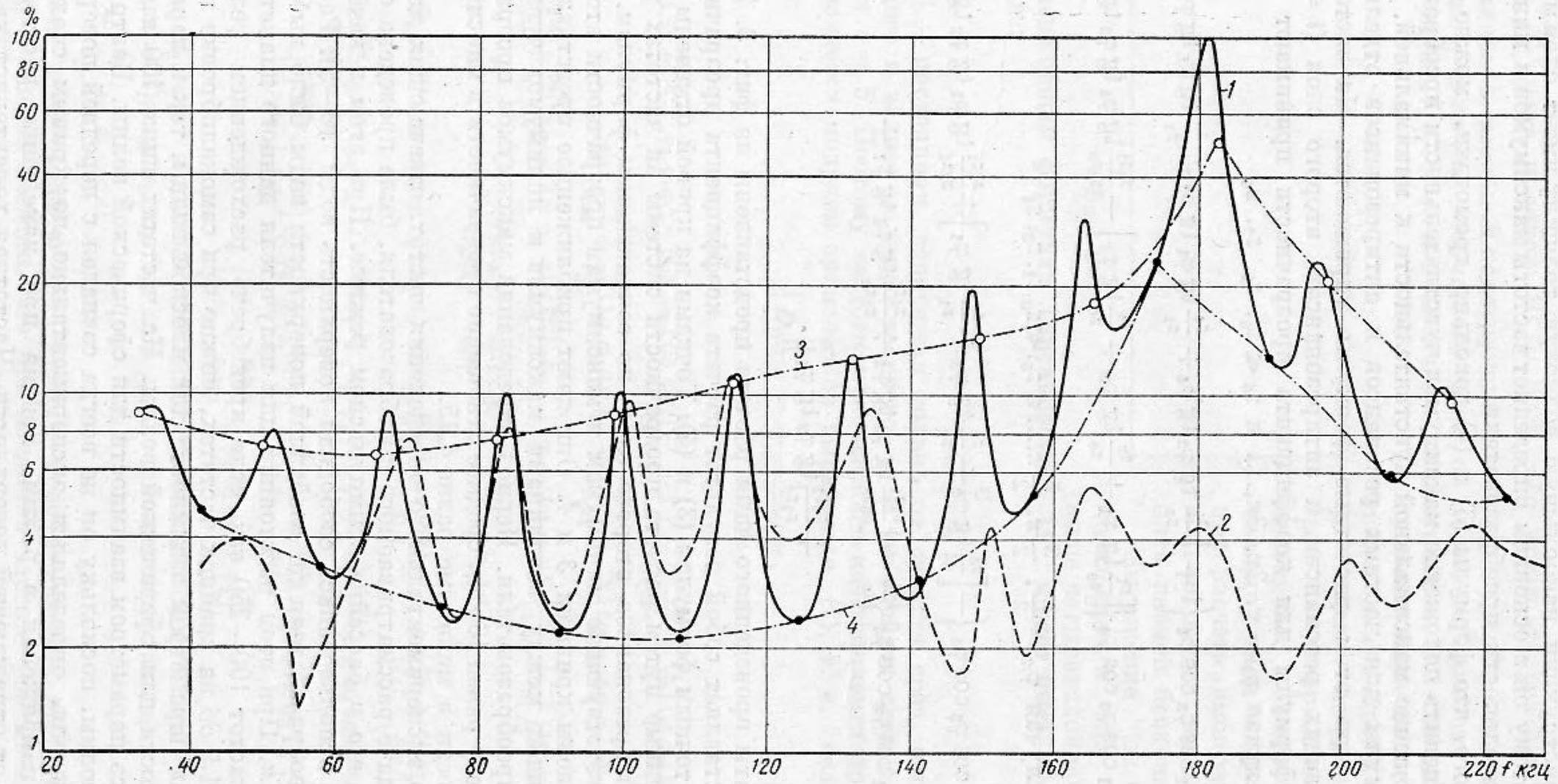
$$B = 2^4 \cos\varphi_1 \cos\varphi_3 \cos\varphi_4 \left\{\frac{z_2}{z_0} - \left[\frac{z_4 z_2}{z_3 z_0} \operatorname{tg}\varphi_3 \operatorname{tg}\varphi_4 + \frac{z_4 z_1}{z_2 z_0} \operatorname{tg}\varphi_4 \operatorname{tg}\varphi_1 + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \frac{z_3 z_1}{z_2 z_0} \operatorname{tg}\varphi_3 \operatorname{tg}\varphi_1\right]\right\}.$$

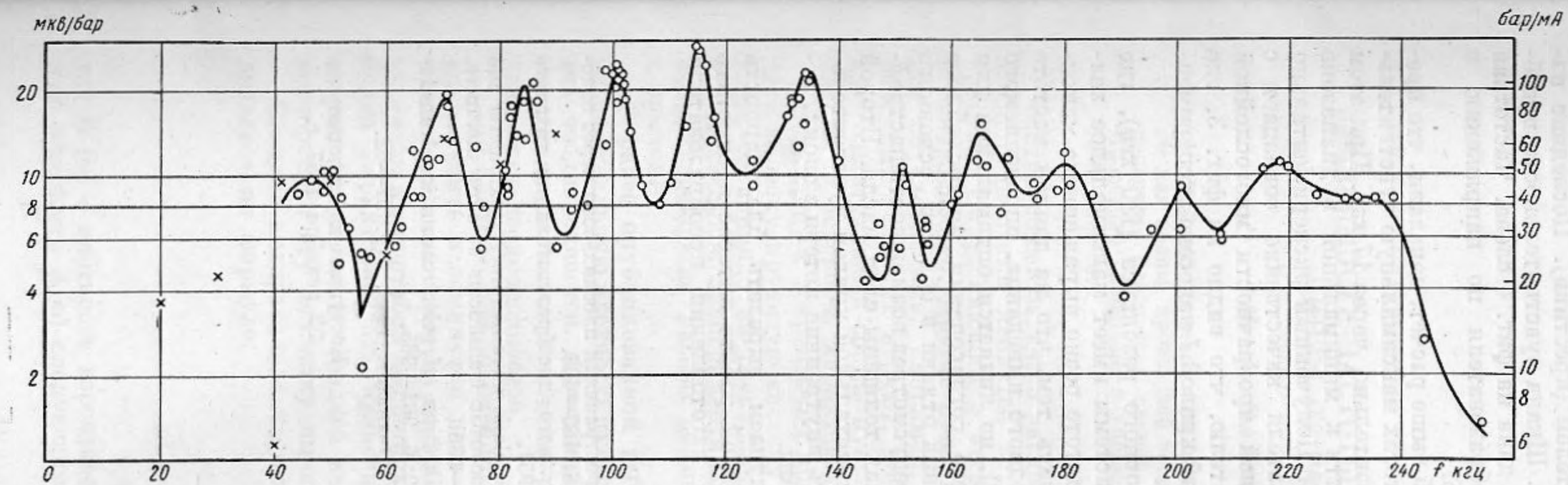
Результаты проведенного нами расчета представлены на фиг. 3. Кривая *1* представляет собой результат расчета коэффициента прозрачности системы по точным формулам (3) и (4). Точками на кривой отмечены данные, полученные путем расчета прозрачности системы на частотах резонансов и антирезонансов второго слоя по сокращенным формулам. Эти точки, соответствующие минимумам и максимумам прозрачности второго слоя, соединены кривыми *3* и *4*. Они дают приближенное представление о соотношениях между величинами максимумов и минимумов чувствительности преобразователя. Период чередования максимумов прозрачности по расчету равен 16 *кгц*; среднее отношение прозрачности в максимуме к прозрачности в минимуме равно 4,75.

С целью экспериментального определения частот, отвечающих максимальной отдаче рассматриваемого преобразователя, была проведена самокалибровка его в бассейне в импульсном режиме. При этом в качестве отражателя использовалась свободная поверхность воды [3—5]. Расстояние от преобразователя до свободной поверхности воды было выбрано равным ~ 1 *м*. При этом расстоянии для излучателя данного диаметра в диапазоне частот 100—250 *кгц*, если пренебречь расхождением результатов на $\pm 1{,}5$ *дб* на крайних частотах, можно при самокалибровке пользоваться как параметром взаимности для плоской волны, так и параметром взаимности для сферической волны. На частотах ниже 100 *кгц* мы пользовались параметром взаимности для сферической волны. Центр расхождения волны, поскольку он не всегда совпадал с передней поверхностью излучателя, определялся экспериментально по кривым спадания выходного напряжения в режиме приема при изменении расстояния излучателя от отражающей поверхности. Частотная характеристика чувствительности преобразователя в режиме приема, полученная в результате самокалибровки, приведена на фиг. 4.

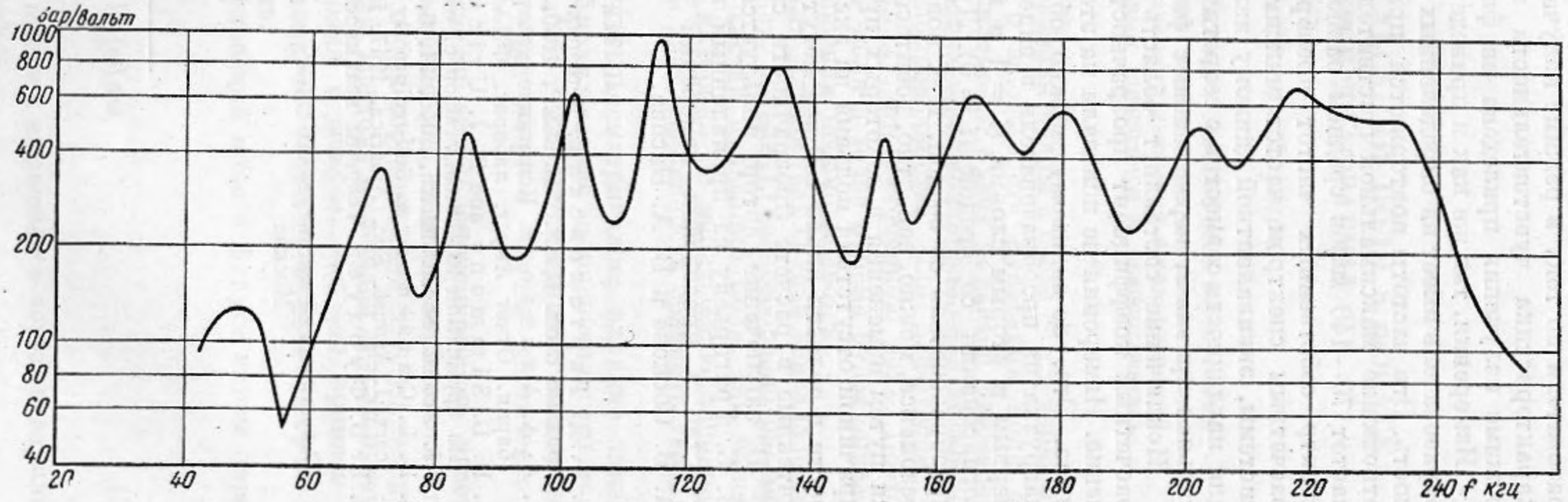
Заметим, что данные о чувствительности преобразователя в режиме приема, полученные при самокалибровке (точки на фиг. 4), удовлетворительно совпадают с результатами измерений чувствительности в открытом


%
100
80
60
40
20
10
8
6
4
2
1
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220 f кгц
1
2
3
4

Фиг. 3


мкв/бар
бар/мА
20
10
8
6
4
2
100
80
60
50
40
30
20
10
8
6
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240 f кгц

Фиг. 4


бар/вольт
1000
800
600
400
200
100
80
60
40
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240 f кгц

Фиг. 5

пространстве методом трех преобразователей (крестики). Последние изменения были проведены В. М. Царевым. Шкала чувствительности преобразователя по току в режиме излучения дана на фиг. 4 слева. Частотная характеристика чувствительности преобразователя по напряжению в режиме излучения приведена на фиг. 5.

Измерения, так же как и приведенный выше расчет, показали, что преобразователь имеет на определенных частотах максимальную чувствительность. Эти частоты повторяются приблизительно через 17 *кгц*. При этом отношение максимальной чувствительности к минимальной в диапазоне частот 70—140 *кгц* в среднем равно 3,3. Полученный экспериментально спектр собственных частот преобразователя качественно совпадает с расчетным спектром частот максимальной прозрачности многослойной системы, эквивалентной данному излучателю, что видно из фиг. 3, где для наглядности совместно с теоретической кривой *1* нанесена экспериментальная кривая *2*, перенесенная с фиг. 4.

Исключение составляет область основного резонанса (180 *кгц*), где расчетный коэффициент прозрачности системы имеет максимальное значение. Измерения не показали на этой частоте резко выраженного максимума. Это, по-видимому, можно объяснить тем, что на данной частоте нагрузка на преобразователь в виде входного импеданца, определяемого первым и вторым слоями ($i = 1$ и $i = 2$), не является оптимальной для согласования со средой ($i = 0$). Лучшего согласования многослойного преобразователя со средой, т. е. повышения отдачи в области основного резонанса, можно, вероятно, добиться, предусмотрев возможность настройки путем изменения в некоторых пределах толщины слоя масла. Второй причиной отсутствия подъема на экспериментальной кривой чувствительности в области около 180 *кгц* могут быть внутренние потери в слоях, неучтенные в расчете прозрачности системы.

В заключение автор пользуется случаем выразить благодарность В. С. Григорьеву за проявленный к данной работе интерес и отметить участие в проведении измерений и в изготовлении преобразователя А. В. Соснова и В. А. Басова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Д. Тартаковский. К теории распространения плоских волн через однородные слои. Докл. АН СССР, 1950, **71**, 3, 465—468.
2. А. А. Ананьева. Испытание ультразвукового преобразователя из титаната бария. Отчет Акуст. лаборат. ФИАН, 1951.
3. B. D. Simmons and R. J. Urick. The plane wave reciprocity parameter and its application to the calibration of electroacoustic transducers at close distances. J. Acoust. Soc. America, 1946, **21**, 6, 633—635.
4. E. L. Carstensen. Self-reciprocity calibration of electroacoustic transducers. J. Acoust. Soc. America, 1947, **19**, 702; 6, 961—965.
5. В. В. Фурдуев. Теоремы взаимности. Гостехиздат, 1948, стр. 57—62.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
23 декабря 1957 г.