Здесь g_i — кратность вырождения, R — газовая постоянная, $x = h\nu_i / kT$, h — постоянная Планка, ν_i — частота нормальных колебаний ($i \geqslant 1$), T — абсолютная температура.

В таблице значения $C^*_{\text{полн}}$ сопоставлены со значениями $C_{\text{ак}}^*$. Сравнение величин $C_{\text{ак}}^*$ с теоретическими значениями $C^*_{\text{полн}}$ позволяют высказать предположение о том, какие степени свободы затрагиваются в данном релаксационном процессе. Для жидкого тиофена и нитрометана в пределах ошибок опыта $C^*_{\text{полн}} \simeq C_{\text{ак}}^*$. Этот факт дает основание предполагать, что акустическая дисперсия в жидком тиофене и нитрометане в исследованном нами диапазоне частот и температур обусловлена релаксацией всех колебательных степеней свободы молекул. В случае фторбензола, хлорбензола, бромбензола, иодбензола, нитробензола $C^*_{\text{полн}} > C_{\text{ак}}^*$. Можно полагать, что низкочастотные нормальные колебания молекул C_6H_5F; C_6H_5Cl; C_6H_5Br; C_6H_5J и $C_6H_5NO_2$ релаксируют в более высоком диапазоне частот.

В соответствии с проведенными ранее исследованиями [8—9] можно считать, что в жидком триэтиламине и н-гексане ассоциированные комплексы, обусловленные водородными связями не существуют, а колебательная релаксация и броуновские вращения протекают на частотах выше $\sim 10^{11}$ *гц*. Поэтому можно полагать, что акустическая дисперсия в триэтиламине и н-гексане вызвана поворотно-изомерной релаксацией.

В заключение выражаем благодарность М. И. Шахпаронову за обсуждение результатов измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. К. Хабибуллаев, М. Г. Халиулин. Высокочастотная импульсная установка для исследования акустических свойств жидкостей на частотах 300—950 *Мгц*. Ультразв. техн., 1967, 3, 47—50.
2. В. С. Старунов, И. Л. Фабелинский. Тепловое и вынужденное молекулярное рассеяние света. Материалы к симпозиуму «Рэлеевское рассеяние света и строение жидкостей». Изд-во МГУ, 1967, 206—250.
3. G. Herzberg. Molecular spectra and molecular structure, 1945, 2.
4. М. И. Шахпаронов. О механизме колебательной релаксации в жидкостях, не имеющих межмолекулярных водородных связей. Сб. «Примен. ультраакуст. к исслед. вещества», М., МОПИ, 1967, 23, 105—115.
5. В. Ф. Ноздрев. Применение ультраакустики в молекулярной физике. М., Физматгиз, 1958.
6. П. К. Хабибуллаев, К. Парпиев, Т. Маманов, М. Г. Халиулин, С. С. Алиев. Низкотемпературная импульсная ультразвуковая установка для исследования акустических свойств жидкостей на частотах 20—1000 *Мгц*. Ультразв. техн., 1968, 3, 1—4.
7. И. Г. Михайлов, В. А. Соловьев, Ю. П. Сырников. Основы молекулярной акустики. М., «Наука», 1964.
8. У. Мэзон. Свойство газов, жидкостей и растворов. М., «Мир», 1968.
9. С. С. Алиев, П. К. Хабибуллаев. Акустическая дисперсия в жидком триэтиламине. Акуст. ж., 1969, 15, 4, 510—512.

Московский государственный университет

Поступило в редакцию 15 июля 1969 г.

УДК 534.232.082.73

СФЕРИЧЕСКИЙ ГИДРОФОН ИЗ КЕРАМИКИ ТИТАНАТА-ЦИРКОНАТА СВИНЦА (ЦТС 13/1)

А. А. Ананьева, Г. И. Гусакова, Л. Р. Зайонц, А. В. Соснов

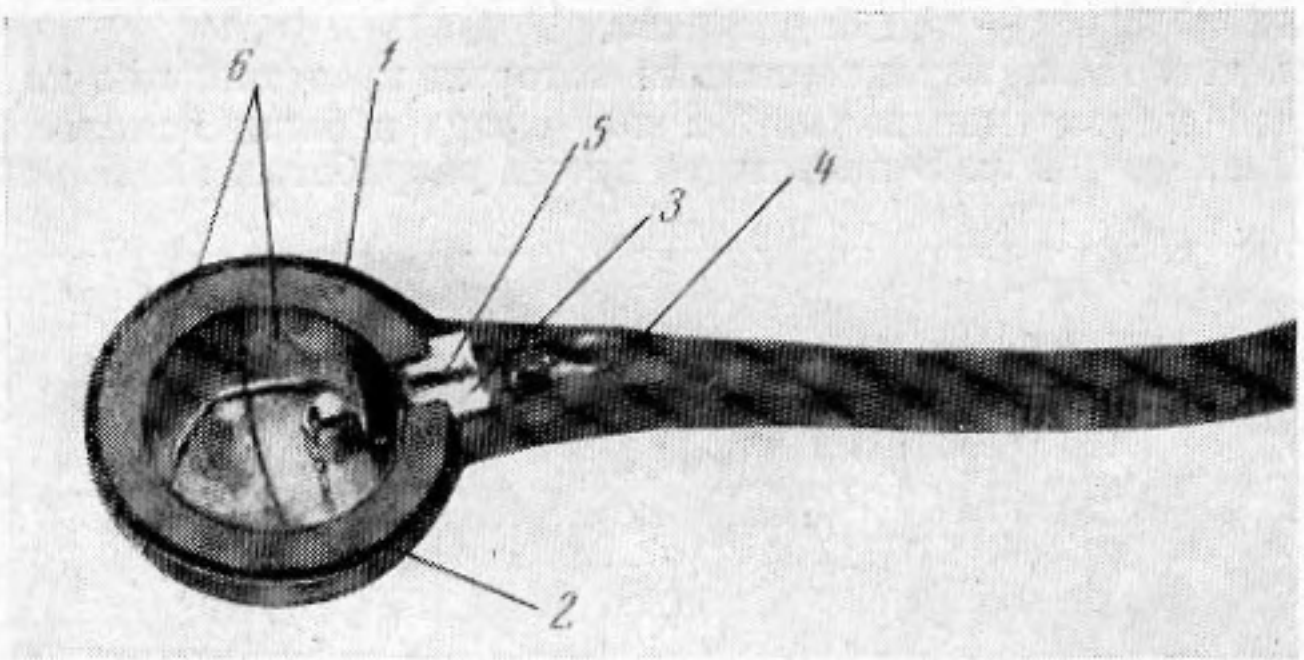
Сферические гидрофоны с чувствительным элементом из пьезокерамики титаната бария в настоящее время широко известны [1]. Их чувствительность в полосе частот ниже собственного электромеханического резонанса, связанного с радиальными колебаниями чувствительного пьезоэлемента в виде тонкостенной сферической оболочки, приближенно равна статической. Она определяется для тонкостенного пьезоэлемента из керамики титаната бария, имеющей значения диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 1200$ и пьезоэлектрического модуля $d_{31} = 1{,}4 \cdot 10^{-6}$ *ед* CGSE, величиной $V/p_0 = b \times 4{,}7$ *мкв/бар*, где b — радиус наружной поверхности сферы, V — разность потенциалов между обкладками сферического пьезоэлемента, p_0 — избыточное давление на внешней поверхности сферической оболочки.

Известно, что различные составы керамики системы титанат-цирконат свинца имеют существенно более высокие значения пьезоэлектрических постоянных, чем керамика титаната бария. Ниже приводятся сведения о сферических гидрофонах с радиально поляризованным элементом, при внешнем диаметре последнего $2b = 50$ *мм*,

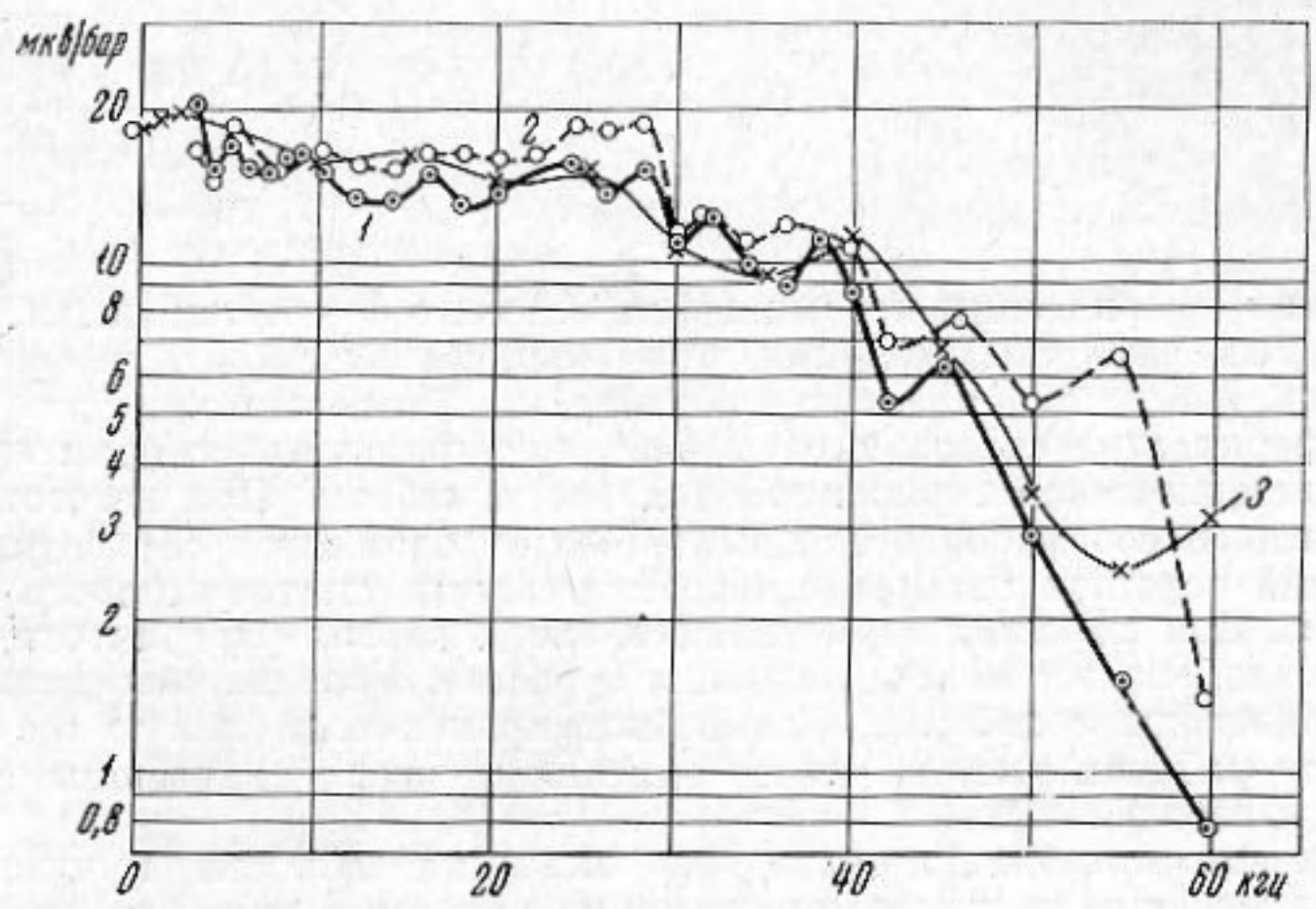
и $2b = 30$ *мм*, выполненных из керамики титаната-цирконата свинца состава

$$Pb_{0,95}Sr_{0,05}(Ti_{0,47}Zr_{0,53})O_3 + 1\%\ Ta_2O_5 \qquad (ЦТС\ ^{13}/_{1}),$$

имеющей значения диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 1350$ и пьезоэлектрического модуля $d_{31} = (3{,}5 \div 4{,}1) \cdot 10^{-6}$ *ед* CGSE. Разрез сферического гидрофона показан на фиг. 1. Пьезокерамический радиально поляризованный элемент *1* с металлическими электродами *6* укреплен на конце токонесущего кабеля; наружная металлизованная поверхность пьезоэлемента покрыта влагозащитным слоем герметика *2*, нанесенным



Фиг. 1



Фиг. 2

на поверхность холодным способом. Ввод центральной токонесущей жилы кабеля к пьезоэлементу осуществлен через втулку *3* из электроизоляционного материала при помощи специального винта *5*; место соединения пьезоэлемента с кабелем защищено от проникновения влаги резиной *4*.

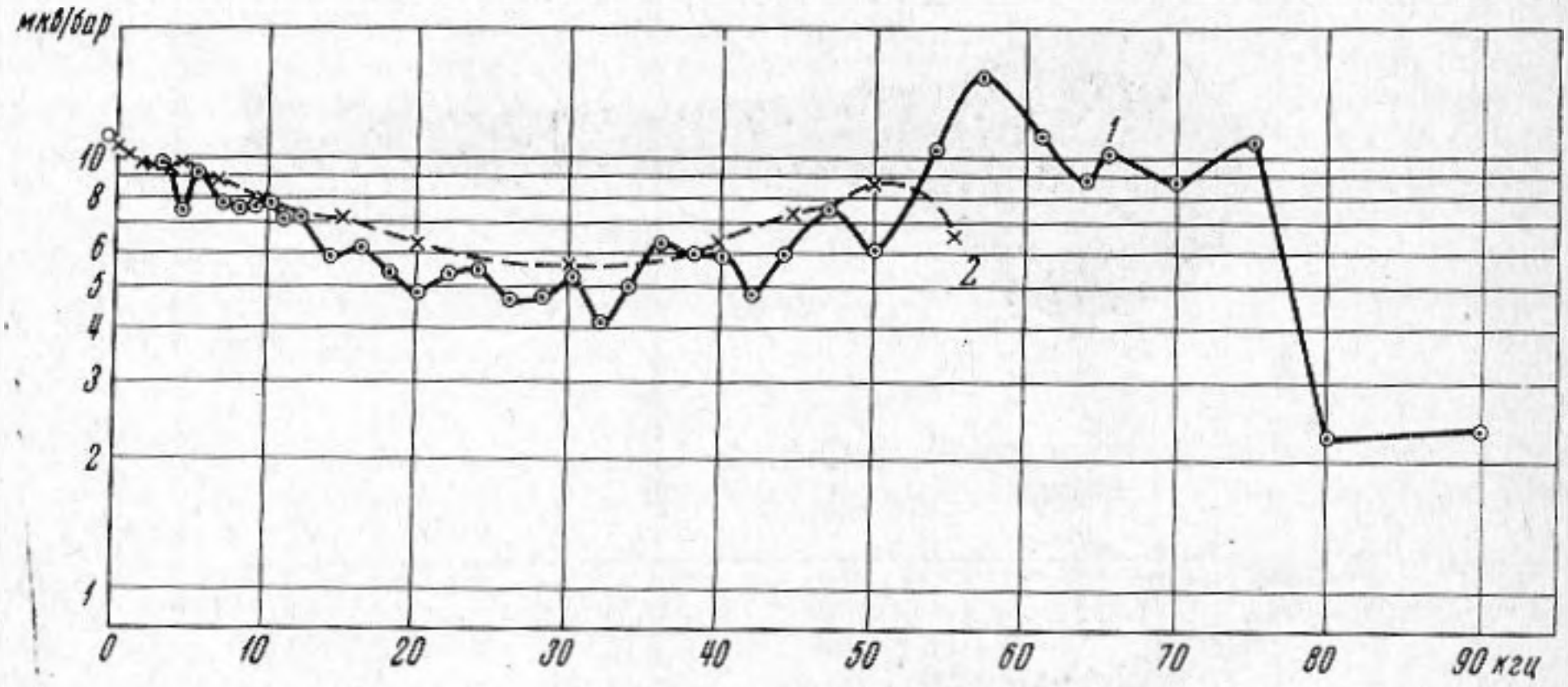
На фиг. 2 представлены частотные характеристики чувствительности сферических гидрофонов диаметром 50 *мм* из керамики указанного выше состава. Кривые *1*, *2* и *3* относятся к трем гидрофонам с геометрически одинаковыми пьезоэлементами. Хорошее совпадение частотных характеристик говорит о том, что гидрофоны достаточно идентичны. На фиг. 3 приведены частотные характеристики гидрофона со сферическим пьезоэлементом, наружный диаметр которого составляет 30 *мм*, измеренные в звукомерном бассейне (кривая *1*) и свободном пространстве (кривая *2*). На фиг. 2 и 3 кружками на оси ординат отмечены значения статической чувствительности гидрофона, измеренные в режиме холостого хода.

Частотные характеристики, представленные на фиг. 2 и 3, получены путем калибровки методом взаимности трех преобразователей при импульсной их работе. Относительная погрешность определения чувствительности этим методом не превышает 10%.

Описанные сферические гидрофоны имеют сравнительно равномерную характеристику чувствительности от самых низких частот до первого радиального резонанса, частота которого для гидрофонов с $2b = 30$ *мм* равна 55 *кгц*, а с $2b = 50$ *мм* — 30 *кгц*.

Радиальный резонанс слабо или совсем не проявляется на частотной характеристике чувствительности, поскольку небольшое (из-за низкой механической добротности материала) повышение чувствительности почти полностью компенсируется уменьшением чувствительности вследствие неравномерного распределения давления на поверхности сферы, когда размеры сферы становятся соизмеримы с длиной звуковой волны в воде. Рабочая полоса при неравномерности частотной характеристики в 6 *дб* для описанных гидрофонов с $2b = 30$ *мм* ограничена частотой ≈ 50 *кгц*, а с $2b = 50$ *мм* — частотой ≈ 30 *кгц*. Рабочие полосы частот для сферических гидрофонов из материала титаната бария ограничены для гидрофонов с $2b = 30$ *мм* частотой 50 *кгц*, а с $2b = 50$ *мм* — частотой 30 *кгц*.

Гидрофоны, частотные характеристики которых представлены на фиг. 2 и фиг. 3 имели составные пьезоэлементы (из 2-х полусфер) и были использованы для измерений на глубинах до 100 *м*. В настоящее время разработан более рациональный ме-



Фиг. 3

тод изготовления сферических керамических элементов — метод литья под давлением в специальных разборных формах, позволяющий исключить после обжига элементов какую-либо механическую обработку. Этот метод дал возможность изготовлять сферические пьезоэлементы без диаметрального соединительного шва с небольшой цилиндрической горловиной для ввода кабеля. При изготовлении пьезоэлементов таким способом более экономно (без отходов из-за обработки) расходуется керамический порошок титаната-цирконата свинца, синтез которого сложнее, чем титаната бария. При хорошей герметизации ввода кабеля сферические гидрофоны с такими пьезоэлементами весьма надежны в работе. Усредненные данные для этих гидрофонов приведены в таблице. Они имеют практически такую же чувствительность и полосу рабочих частот, что и описанные выше гидрофоны с составными сферическими пьезоэлементами.

Для сравнения в таблице приведены значения емкости и чувствительности сферических гидрофонов с пьезоэлементами из керамики титаната бария.

Диаметр, *мм*	Толщина стенки, *мм*	Емкость, *пф*	Чувствительность, *мкв/бар*	Материал
48	2,5	29000—32000	24—17	ЦТС 13/1
50	2,5	—	8—7	Титанат бария
30	2,5	6000	14—12	ЦТС 13/1
30	2,5	7800—7500	4,8—3,8	Титанат бария

В заключение следует сказать, что применение керамики титаната-цирконата свинца (ЦТС 13/1) вместо титаната бария для сферических чувствительных элементов измерительных гидрофонов позволило повысить чувствительность сферических гидрофонов более чем в 2 раза (при сохранении равных геометрических размеров) без существенного сужения рабочей полосы и практически при сохранении той же собственной емкости пьезоэлемента. Описанные гидрофоны могут применяться без поправок на изменение чувствительности с глубиной до давлений 50 *атм*.

Измерения частотных характеристик проведены радиотехником З. С. Пожитко. Авторы благодарят ее за тщательное выполнение работы по калибровке гидрофонов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Ананьева. Керамические звукоприемники. М., Изд-во АН СССР, 1963.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступило в редакцию
7 июля 1969 г.