

**МОСКОВСКИЙ  
ДОМ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОПАГАНДЫ  
имени Ф. Э. Дзержинского**

**ВСЕСОЮЗНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ  
ТЕХНИКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

1957

**Ультразвуковые измерения**

(Конспект)



МИНИАТУРНЫЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИЕМНИКИ УЛЬТРАЗВУКА

1. ВВЕДЕНИЕ

При исследовании некоторых акустических задач бывает необходимо измерять в жидкости звуковое давление, являющееся сложной функцией координат и времени. Например, давление в фокальной области ультразвуковых линз и фокусирующих излучателей весьма быстро меняется от точки к точке, а при повышении амплитуды давления форма волны начинает изменяться из-за нелинейности уравнения состояния среды и уравнения движения. Для подобных измерений необходимы широкополосные ненаправленные приемники с размерами приемной части, вводимой в исследуемое поле, меньше длины волны. Проблема создания таких приемников имеет ряд трудностей.

Обычно применяются приемники с пьезоэлектрическим или магнитострикционным чувствительным элементом. Эти приемники бывают двух видов. У одних приемников в исследуемое поле вводится непосредственно чувствительный элемент, у других — волновод, на внешнем конце которого расположен чувствительный элемент. Волноводы выполняются обычно в виде металлического стержня  $/L/$  и имеют тот недостаток, что на высоких частотах, когда длина волны в материале стержня становится сравнимой с диаметром стержня, оказывается заметной дисперсия. Поэтому практически весьма трудно осуществить приемник с волноводом, пригодный для анализа формы сигнала с полосой, например, до 10 мГц. Приемники с чувствительным элементом, непосредственно вводимым в исследуемое поле, могут иметь ярко выраженную направленность даже в том случае, когда размер элемента много меньше длины волны. Так обстоит дело, например, с пьезоэлементом в виде кубика, имеющего электроды на двух противоположных гранях и выполненного из керамического титаната бария, применение которого необходимо, чтобы иметь

сколько-нибудь заметную емкость при малых размерах. Неравномерность диаграммы направленности таких приемников объясняется, повидимому, тем, что пьезоэлемент частично увлекается колеблющейся жидкостью и в нем возникают механические напряжения инерционного происхождения, способные вызвать пьезоэффект, перекрывающий при определенной ориентации пьезоэлемента в звуковом поле, пьезоэффект от гидростатического давления. На практике приемник с пьезоэлементом в виде куба со стороной 1 см. имел на частоте 10 кгц диаграмму направленности с провалами до нуля/2/. Чтобы ликвидировать этот недостаток, пьезоэлементам придают форму сферических и цилиндрических оболочек с радиальной поляризацией. Наиболее широкополосный приемник этого типа имел пьезоэлемент в виде полого цилиндра из керамического титаната бария с диаметром и длиной около 1,5 мм /3,4/. Этот приемник имел горизонтальную частотную характеристику чувствительности до 1 мгц и круговую диаграмму направленности в плоскости, перпендикулярной к оси цилиндра. Дальнейшее расширение частотной полосы наталкивается на трудности, связанные с изготовлением и монтажом пьезоэлементов малых размеров.

В настоящей работе изложен способ, позволяющий преодолеть эти трудности, и дается описание конструкции, технологии изготовления и методики калибровки пьезоэлектрических приемников с пьезоэлементом из керамического титаната бария с максимальным размером около 0,2 мм. Приемник имеет частотную характеристику с полосой до 10 мгц при неравномерности на 10 мгц около 30%, круговую диаграмму направленности в плоскости, перпендикулярной к оси держателя пьезоэлемента, и чувствительность около 0,004-0,007 мкв/бар.

## 2. Конструкция и технология изготовления

Конструкция приемника схематически изображена на фиг. 1. Чувствительный элемент приемника выполнен в виде сферического слоя из керамического титаната бария толщиной около 0,05 мм 1, нанесенного на платиновый шарик 2, оплавленный на конце проволоки 3 диаметром 0,05 мм. Шарик является внутренним электродом, а проволока подводкой к нему. Проволока проходит внутри капилляра 1, к торцу которого присоеди-

нен шарик. Капилляр является продолжением стеклянной трубки 5, которая служит держателем и коаксиальным выводом. На внешнюю поверхность трубки, капилляра и керамического слоя нанесен серебряный электрод 6. Трубка заканчивается переходным патронном 7, предназначенным для соединения приемника с предварительным усилителем.

Отличительной чертой конструкции этого приемника является то, что пьезоэлемент изготавливается не отдельно, а спекается непосредственно на внутреннем электроде. Материалом для внутреннего электрода выбрана платина потому, что она, во-первых, способна выдержать температуру спекания титаната бария /1380°/, во-вторых, не окисляется при этой температуре и почти не реагирует с титанатом бария, в-третьих, обладает малым удельным сопротивлением, что важно при малой толщине проволоки.

Шарик диаметром 0,05-0,15 мм на конце проволоки можно оплавить в электрической дуге от анодной батареи. Форма его контролируется под микроскопом.

Керамический слой наносится путем спекания порошка титаната бария на шарике. Для этого предварительно кусок керамики размальывается и растирается в агатовой ступе. Полученный порошок разбавляется дистиллированной водой и отмучиванием отделяется тонкая фракция с размерами частиц не более 0,01 мм. Вода затем выпаривается, и из порошка получается сметанообразная масса. Платиновый шарик покрывается тонким слоем этой массы и обжигается в пламени бензиновой горелки. Строгий контроль температуры при этом не обязателен, следует лишь обращать внимание на то, чтобы титанат бария не плавился. Эта операция повторяется несколько раз до получения слоя нужной толщины.

Затем проволока, на конце которой находится шарик, вставляется в капилляр с внутренним диаметром меньше диаметра шарика. Капилляр оттягивается от стеклянной трубки диаметром около 5 мм. Торец капилляра шлифуется агатовым бруском так, чтобы его плоскость была перпендикулярна оси и шарик равномерно соприкасался со стеклом. Это благоприятствует симметричному относительно оси присоединению шарика к торцу капилляра. Присоединение шарика осуществляется сваркой в пламени горелки и контролируется под

микроскопом. Нельзя допускать полного оплавления шарики стеклом. Это <sup>сильно</sup> понизит чувствительность приемника.

Внешний электрод наносится методом вжигания серебра. Для этого на внешнюю поверхность наносится специальная паста и после высушивания производится обжиг при 450-500° до полного восстановления серебра. Необходимо следить, чтобы температура не поднялась слишком высоко и стекло не начало деформироваться.

Поляризация керамического слоя производится при напряженности поля около 20 кв/см. При эксплуатации приемника целесообразно работать с постоянной подполяризацией, подавая на вход предварительного усилителя, к которому подключен приемник, анодное напряжение через сопротивление в несколько мегом. При наличии постоянной подполяризации чувствительность приемника несколько выше, чем при наличии только остаточной поляризации.

Емкость приемника, равная сумме емкостей пьезоэлементов и коаксиального вывода, составляет 20 пф, причем емкость коаксиального вывода равна приблизительно 5 пф.

### 3. Определение диаграммы направленности и калибровка

Испытания приемников производились в импульсном режиме. Это избавило измерения от погрешностей, вносимых электрической наводкой, и позволяло работать в незаглушенной ванне. На фиг. 2 изображена блок-схема установки, применявшейся при определении диаграмм направленности и при калибровке приемников. Синусоидальное напряжение от генератора 1 и импульсное напряжение от генератора импульсов 2 подводилось к усилителю с балансной схемой 3. Получаемые на его выходе импульсы с высокочастотным заполнением, имеющие длительность 10 мксек и частоту повторения 3 кГц, подавались на излучатель 4. Излучатель представлял собой диск из керамического титаната бария, укрепленный на изогнутой стеклянной трубке и покрытый изолирующим лаком. На излучатель через сопротивления  $R_2 = R_3 = 1$  мегом подавалось для подполяризации постоянное напряжение, равное 110 в. Акустический сигнал от излучателя в ванне 7 принимался приемником 8, укрепленным в координатном устройстве и присоединенным к

предварительному усилителю с катодным повторителем 9. На входе катодного повторителя имелось постоянное напряжение подполяризации, равное постоянному напряжению на излучателе. Сигнал от предварительного усилителя подавался на осциллограф Ю.

Снятие диаграмм направленности показало, что, как и следовало ожидать, диаграммы направленности приемника в плоскости, перпендикулярной к его оси, являются круговыми, так как пьезоэлемент в этой плоскости полностью симметричен. На фиг. 3 приведены диаграммы направленности, снятые на частотах 3 и 8 мгц.

Из-за малой чувствительности приемников нам не удалось осуществить их абсолютную калибровку. Поэтому определение чувствительности приемников производилось путем сравнения со вспомогательным приемником, калиброванным абсолютно методом взаимности по полю. Калибровка вспомогательных приемников производилась по известной схеме трех измерений в квазисферическом поле. Схема измерений изображена на фиг. 4. На этой схеме  $\Gamma$  - вспомогательный приемник, линейный в рабочем диапазоне давлений,  $\Pi$  - вспомогательный излучатель, линейный в рабочем диапазоне токов,  $O$  - вспомогательный обратимый преобразователь, используемый попеременно в режиме приема и излучения и линейный в рабочем диапазоне токов и давлений.  $E_1, E_2$  и  $E_3$  - напряжения холостого хода, развиваемые преобразователями в режиме приема,  $I_1, I_2$  и  $I_3$

токи через преобразователи, работающие в режиме излучения,  $d$  - расстояние между преобразователями.

Чувствительность вспомогательного приемника определяется формулой /5/.

$$M_s = 4,48 \cdot 10^{-4} \frac{1}{f} \sqrt{\frac{E_1 E_2}{E_3} \cdot \frac{I_3}{I_1 I_2} \cdot \frac{d}{R}} \cdot \alpha$$

где  $\rho$  - плотность среды

$f$  - частота

$K$  - коэффициент соответствия квазисферического и плоского полей, в нашем случае практически равный единице.

$\alpha$  - коэффициент подполющения.

Вспомогательные преобразователи были изготовлены описанным ранее. Калибровка производилась в диапазоне от 1 до 10 мгц. Этот диапазон не удалось перекрыть с одним и тем же излучателем, поэтому использовались два излучателя-излучатель с диаметром  $D = 3$  мм и толщиной  $\delta = 0,35$  мм на частотах от 1 до 7 мгц и излучатель с  $D = 2$  мм и  $\delta = 0,2$  мм на частотах от 7 до 10 мгц. Преобразователь Г имел  $D = 2$  мм и  $\delta = 0,2$  мм, преобразователь О имел  $D = 3$  мм и  $\delta = 0,3$  мм.

Чтобы соблюсти условие квазисферичности поля, расстояние было выбрано достаточно большим. На частотах до 4 мгц оно равнялось 13 см., на частотах до 10 мгц - 18 см.

Чтобы избежать значительного ослабления сигнала, измерения производились в воде. Поскольку вспомогательные преобразователи не экранированы, то, чтобы избежать перегрузки предварительного усилителя большой в этом случае заводкой, оказалось необходимым разделить ванну органической перегородкой 6 толщиной 0,05 мм на два отсека, один из которых наполнен трансформаторным маслом, другой - водой, и поместить излучатель в отсек с маслом в непосредственной близости от перегородки.

Ток через излучатель, как показано на фиг. 2, определялся путем измерения напряжения на активном сопротивлении  $R_1 = 11$  ом, последовательно включенном с излучателем. Напряжение холостого хода определялось как напряжение на входе предварительного усилителя, поскольку входное сопротивление его было много больше внутреннего сопротивления всех преобразователей, в том числе и миниатюрного приемника, в диапазоне от 1 до 10 мгц.

На фиг. 5 приведена частотная характеристика чувствительности вспомогательного приемника с  $D = 2$  мм и  $\delta = 0,2$  мм. При помощи этого приемника определялось давление в такой области звукового поля, где оно мало меняется в пространстве. Затем в эту область помещался калибруемый миниатюрный приемник. Результаты калибровки миниатюрного приемника обозначены на фиг. 6 кружками. Эти результаты получены с точностью не хуже 20%.

Частотный ход чувствительности миниатюрных приемников определялся еще и другим способом. Этот способ аналогичен способу, предложенному в /6/ и состоит в следующем. Представим, что звуковое поле частоты  $\omega$  модулировано частотой  $\Omega$ . Мгновенное значение плотности энергии в таком поле равно

$$E = \frac{p_0^2}{\rho c^2} (1 + m \cos \Omega t)^2 \cos^2 \omega t,$$

где  $p_0$  - амплитуда звукового давления

$m$  - глубина модуляции

$c$  - скорость звука.

Среднее значение  $E$  за время, малое по сравнению с периодом модуляции, но большое по сравнению с периодом высокочастотных колебаний, равно

$$\bar{E} = \frac{p_0^2}{2\rho c^2} (1 + m \cos \Omega t)^2$$

Радиационное давление пропорционально плотности энергии

$$P = k \bar{E} = k \frac{p_0^2}{2\rho c^2} (1 + m \cos \Omega t)^2$$

Амплитуда переменной части радиационного давления, имеющей частоту  $\Omega$ , равна

$$P_0 = k \frac{p_0^2}{\rho c^2} m$$

Если поместить приемник в модулированное звуковое поле, то, в случае его линейности, можно найти

$$V_0 = M_{\Omega} \cdot P_0$$

где  $V_0$  и  $U_0 = M \cdot P_0$  - амплитуды электрического напряжения, обусловленного соответственно радиационным и звуковым давлением;  $M_{\Omega}$  и  $M$  - чувствительность приемника на частоте  $\Omega$  и  $\omega$ .

Положим  $M_{\Omega}$  и  $M$  постоянными и зафиксируем частоту  $\Omega$ . Тогда для фиксированной частоты  $\Omega$ , и для изменяющейся частоты  $\omega$  можно написать следующие соотношения:

$$V_0' = \frac{M_{\Omega} k m}{\rho c^2} (p_0')^2 = \frac{M_{\Omega} k m}{\rho c^2} \left( \frac{U_0'}{M} \right)^2$$

$$V_0 = \frac{M_{\Omega} k m}{\rho c^2} (p_0)^2 = \frac{M_{\Omega} k m}{\rho c^2} \left( \frac{U_0}{M} \right)^2$$

где  $p_0'$ ,  $U_0'$  и  $M'$  - соответственно звуковое давление, напряжение, выдаваемое приемником, и чувствительность на частоте  $\omega$ .

Отсюда можно найти  $\frac{M}{M'} = \left(\frac{2c}{v_0'}\right) \sqrt{\frac{V_0'}{V_0}}$

Это выражение дает чувствительность приемника на всех частотах, отнесенную к чувствительности на частоте  $\omega_0$ .

По этому способу была определена относительная чувствительность миниатюрных приемников. На фиг. 7 изображена блок-схема соответствующей этому способу установки. Синусоидальное напряжение частоты  $\omega$  от генератора 1 и синусоидальное напряжение частоты  $\Omega = 126$  кгц от генератора 2 подавалось на смеситель-усилитель 3. Модулированное напряжение подводилось к излучателю. Чтобы получить достаточно большое звуковое давление, излучатели были выполнены в виде части сферического слоя из керамического титаната бария с радиусом кривизны 1 см и углом раскрытия около  $60^\circ$  и с толщиной 1 мм и 2 мм. Исследуемый приемник помещался в фокус излучателя. Напряжение с предварительного усилителя 4 подавалось на осциллограф 6 и избирательный усилитель 5, к выходу которого присоединен вольтметр 7. На осциллографе наблюдалось напряжение  $V_0$ , а на вольтметре — напряжение  $V_0'$ .

Предварительно было установлено, что интенсивность поля рассеяния мала по сравнению с интенсивностью в фокусе и поэтому допустимо работать в незаглушенной ванне. Был найден диапазон напряжений на излучателе, при которых пропорционально  $V_0^2$  и измерения проводились в этом диапазоне.

Результаты определения относительной чувствительности  $\frac{M}{M'}$  в диапазоне от 1 до 5 мгц показаны на фиг. 8 треугольниками. На фиг. видно, что частотные характеристики чувствительности, снятые разными методами, совпадают.

Считаю своим долгом выразить благодарность Н.А. Рюю, предложившему принцип конструкции описанных приемников и руководившему выполнением работы, а также лаборанту Ю.М. Московенко за помощь в проведении экспериментов.

Л и т е р а т у р а

1. *Zelichowski J.* Beitrag zur Ultraschallmesstechnik in Flüssigkeiten, *Acustica* 2, 92, 1952.
  2. АНАНЬЕВА А.А. Приемники звука из керамики титаната бария. Отчет, Акустический институт, 1955 г.
  3. БЕРГМАН Л. Ультразвук, ИЛ, 1956.
  4. *Wolfe R.H.* On experimental study of the collapse of a spherical cavity in water *J.A.S.A.*, 27, 2, 447-454, 1956.
  5. ЯНПОЛЬСКИЙ А.А. Абсолютная градуировка электроакустических преобразователей методом взаимности в квазисферическом поле. Труды комиссии по акустике 8, 37, 1955 г.
  6. ЗВЕРЕВ В.А. О возможности абсолютной калибровки излучателей и приемников звука по давлению радиации без использования радиометра. Акустический журнал. 1956, 2, 4, 378.
-

Подписи к фигурам

- Фиг. 1 - Схема конструкции приемника
- Фиг. 2 - Блок-схема установки, применявшейся при определении диаграмм направленности и при калибровке приемников
- Фиг. 3 - Диаграммы направленности, снятые на частотах 3 и 8 мГц
- Фиг. 4 - Схема трех измерений в квазисферическом поле
- Фиг. 5 - Частотная характеристика чувствительности вспомогательного приемника с  $D = 2$  мм и  $\lambda = 0,2$  мм
- Фиг. 6 - Результаты калибровки миниатюрного приемника
- Фиг. 7 - Блок-схема