



РСФСР — ЛенСНХ

**УПРАВЛЕНИЕ**

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**ЦЕНТРАЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО**

**ПО УЛЬТРАЗВУКОВЫМ И ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ  
УСТАНОВКАМ**

**ТЕХНИКО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ  
БЮЛЛЕТЕНЬ**

№ 1(13)



ЛЕНИНГРАД  
1960

Инж. Е. В. Романенко

## КОНСТРУКЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ МИНИАТЮРНЫХ ПРИЕМНИКОВ УЛЬТРАЗВУКА

### 1. Введение

Измерение ультразвукового давления в жидкости, являющееся сложной функцией координат и времени, представляет известные трудности ввиду того, что приемники ультразвука крупных размеров, как правило, обладают отчетливо выраженными резонансными свойствами и часто некруговой диаграммой направленности. Исследование формы давления и сложных полей (поле фокусирующего излучателя, поле рассеяния и т. п.) также требует приемника, который по размерам был бы много меньше длины волны или самых малых изменений в структуре поля.

Приемники с пьезоэлектрическим и магнитострикционным чувствительным элементом по способу измерения полей делятся на две группы. У приемников одной группы в поле вводится непосредственно чувствительный элемент, у приемников другой группы — волновод. Волновод выполняется обычно в виде металлического стержня [Л.1], один конец которого помещается в поле, а на другом находится чувствительный элемент. Волноводы имеют тот недостаток, что на высоких частотах, когда длина волны в материале стержня становится сравнимой с его диаметром, сигнал сложной формы, проходя по волноводу, искажается. По-видимому сказывается дисперсия. Это значит, что сигналы, содержащие ряд гармоник, не могут быть переданы по волноводу без фазовых искажений. Поэтому при создании широкополостного и миниатюрного приемника ультразвука приходится идти по пути усовершенствования приемников первой группы. Наиболее широкополостный приемник этой группы, который известен в литературе [Л. 2, 3], имел пьезоэлемент в виде полого цилиндра из керамического титаната бария с диаметром и длиной около 1,5 мм. У этого приемника частотная характеристика практически не зависела от частоты в диапазоне до 1 Мгц и диафрагма направленности была круговая в плоскости, перпендикулярной к оси цилиндра.

Сигналы, спектры которых содержат частоты свыше 1 Мгц, не могли быть приняты этим приемником без искажений. В настоящей статье дается описание конструкции, технологии изготовления, методика калибровки и некоторых применений пьезоэлектрических приемников с пьезоэлементом из керамического титаната бария. Размер чувствительного элемента — около 0,1—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 приемника

Конструкция приемника схематически изображена на рис. 1. Чувствительный элемент приемника 1 выполнен в виде сферического

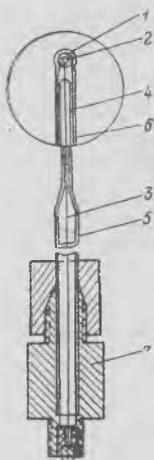


Рис. 1.

слоя из керамического титаната бария толщиной около 0,05 мм, нанесенного на платиновый шарик 2, оплавленный на конце проволоки 3 диаметром 0,5 мм. Проволока проходит внутри капилляра 4, к торцу которого присоединен шарик. Капилляр является продолжением стеклянной трубки 5, которая служит держателем и коаксиальным выводом. На внешнюю поверхность трубки, капилляра и керамического слоя нанесен слой серебра, являющийся электродом 6. Трубка заканчивается переходным патроном 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 сравнительно малым удельным сопротивлением, что важно при малой толщине проволоки.

## 3. Технология изготовления

Шарик диаметром 0,05—0,15 мм на конце платиновой проволоки можно оплавить в пламени бензиновой горелки или в электрической дуге. Форма его контролируется под микроскопом. Для этой цели очень удобно применить бинокулярный стереоскопический микроскоп МБС-1.

или в специальной камере с системой охлаждения  
структур преводится

На платиновый шарик наносится тонкий слой полужидкой массы из титаната бария 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. Полужидкая масса готовится следующим образом. Кусок керамики размалывается и растирается в агатовой ступе. Из полученного порошка отмачиванием в дистиллированной воде отделяется тонкая фракция с размерами частиц 0,005—0,01 мм. Вода затем выпаривается и из порошка приготавливается сметанообразная масса.

Проволока с шариком вставляется в капилляр с внутренним диаметром меньше диаметра шарика. Капилляр получается оттягиванием стеклянной трубки диаметром 5—7 мм. Конец капилляра шлифуется агатовым бруском так, чтобы его плоскость была перпендикулярна оси, а шарик равномерно соприкоснулся со стеклом. Это способствует присоединению шарика к торцу симметрично оси капилляра. Присоединение шарика осуществляется сваркой в пламени горелки и контролируется под микроскопом.

Нельзя допускать полного оплавления шарика стеклом. Это сильно 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 от анодной батареи при напряженности поля 10—20 кВ/см.

При эксплуатации приемника можно работать с постоянной подполяризацией, подавая на вход предварительного усилителя, к которому подключен приемник, анодное напряжение через сопротивление в несколько мегом. При постоянной подполяризации чувствительность приемника несколько выше, чем при наличии только остаточной поляризации.

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

#### 4. Определение диаграмм направленности

На рис. 2 изображена блок-схема установки, применявшейся при изучении диаграмм направленности и при калибровке приемников. Синусоидальное напряжение от генератора 1 и импульсное напряжение от генератора импульсов 2 подводилось к датчику радиоимпульсов 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  $R_2=R_3=1$  Мом подавалось для подполяризации постоянное напряжение, равное 110 в.

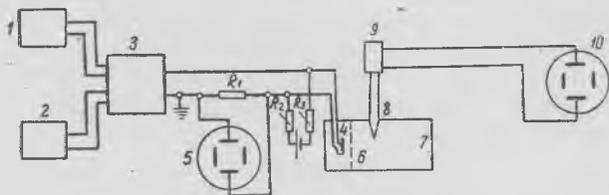


Рис. 2.

Акустический сигнал от излучателя в ванне 7 принимался приемником 8, укрепленным в координатном устройстве и присоединенном 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 10. Использование импульсного режима при испытаниях приемника избавляло от погрешностей вносимых электрическими наводками, и позволяло работать в незаглушенной ванне. Снятые диаграммы направленности приемника в плоскости, перпендикулярной к его оси, являются круговыми, пьезоэлемент в этой плоскости полностью симметричен.

### 5. Калибровка

Определение чувствительности приемников производилось путем сравнения со вспомогательным приемником, калиброванным

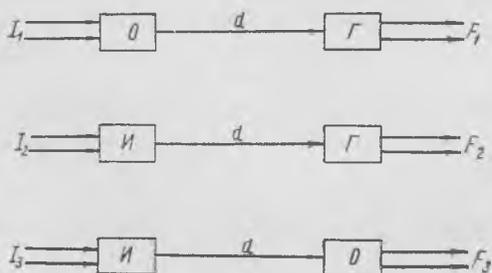


Рис. 3.

абсолютно методом взаимности по полю. Калибровка вспомогательных приемников производилась по известной схеме трех измерений в квазисферическом поле. Схема измерений изображена на рис. 3. На этой схеме Г — вспомогательный приемник, линей-

ный в рабочем диапазоне давлений,  $I$  — 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  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$  — 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.

$$M = 4,48 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K} \sqrt{\frac{E_1 \cdot E_2}{E_3} \cdot \frac{I_3}{I_1 \cdot I_2} \cdot \frac{d}{\delta \cdot \rho}} \cdot e^{\alpha \cdot d}$$

где  $\rho$  — плотность среды;

$f$  — частота;

$K$  — коэффициент соответствия квазисферического и плоского полей, в нашем случае практически равный единице;

$\alpha$  — коэффициент поглощения.

Вспомогательные преобразователи были аналогичны описанным ранее. Калибровка производилась в диапазоне от 1 до 10  $M\mu\zeta$ . Этот диапазон не удалось перекрыть с одним и тем же излучателем, поэтому использовались два излучателя — излучатель с диаметром  $D = 3$  мм и толщиной  $h = 35$  мм на частотах от 1 до 7  $M\mu\zeta$  и излучатель с  $D = 2$  мм и  $h = 0,2$  мм на частотах от 7 до 10  $M\mu\zeta$ . Преобразователь  $\Gamma$  имел  $D = 2$  мм и  $h = 0,2$  мм, преобразователь  $O$  имел  $D = 3$  мм и  $h = 0,3$  мм.

Чтобы соблюсти условие квазисферичности поля, расстояние  $d$  было выбрано достаточно большим. На частотах до 4  $M\mu\zeta$  оно равнялось 13 см, на частотах до 10  $M\mu\zeta$  — 18 см.

Измерения производились в воде. Поскольку вспомогательные преобразователи не экранированы, то, чтобы избежать перегрузки предварительного усилителя большой наводкой, оказалось необходимым разделить ванну органической перегородкой 6 (рис. 2) 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 рис. 2, определялся путем измерения напряжения на активном сопротивлении  $R_1 = 11$  ом, последовательно включенным 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  $M\mu\zeta$ .

Результаты калибровки миниатюрного приемника обозначены на рис. 4 кружками. Точность результатов — не ниже 20%.

Частотная характеристика приемников определялась еще и другим способом. Этот способ аналогичен способу предложенному в [Л. 4] и состоит в следующем.

Представим, что ультразвуковое поле частоты  $\omega$  модулировано частотой  $\Omega$ . Причем  $\omega \gg \Omega$ .

При этом в ультразвуковом поле частоты  $\omega$  появляется переменная часть радиационного давления, меняющаяся с частотой  $\Omega$ . Приемник принимает одновременно ультразвуковые колебания с частотой  $\omega$  и переменную часть радиационного давления частоты  $\Omega$ .



Рис. 4.

Исходя из выражения для плотности энергии в ультразвуковой волне, путем несложных преобразований можно найти, что

$$\frac{M}{M^1} = \left( \frac{v_0}{v_0^1} \right) \sqrt{\frac{V_0^1}{V^1}}$$

где  $M^1$  — чувствительность приемника на частоте  $\omega^1$ ;

$M$  — чувствительность приемника на любой другой частоте  $\omega$ ;

$v_0$  — амплитуда электрического напряжения, выдаваемого приемником и обусловленного ультразвуковым давлением  $\omega$ ;

$v_0^1$  — амплитуда электрического напряжения, выдаваемого приемником и обусловленного ультразвуковым давлением  $\omega^1$ ;

$V_0$  — амплитуда электрического напряжения, выдаваемого приемником и обусловленного радиационным давлением частоты  $\Omega$  при несущей частоте  $\omega$ ;

$V_0^1$  — амплитуда электрического напряжения, выдаваемого приемником и обусловленного радиационным давлением частоты  $\Omega$  при несущей частоте  $\omega^1$ .

Фиксируя  $\varphi^1$  и глубину модуляции и изменяя  $\omega$ , можно изучить частотную характеристику приемника в области частот, где  $\omega \gg \Omega$ , но этим способом нельзя абсолютно калибровать приемник, поскольку неизвестна величина коэффициента пропорциональности между радиационным давлением и плотностью акустической энергии.

По этому способу была определена относительная чувствительность миниатюрных приемников. На рис. 5 изображена блок-схема соответствующей этому способу установки. Синусоидальное напряжение частоты  $\omega$  от генератора 1 и синусоидальное напряжение частоты  $\Omega = 126$  гц от генератора 2 подавалось на сместитель-усилитель 3. Модулированное напряжение подводилось к из-

лучателю. 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—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  $U_0$ , на вольтметре — напряжение  $V_0$ .

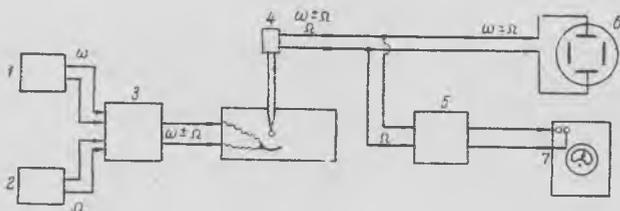


Рис. 5.

Результаты определения относительной чувствительности  $\frac{M}{M_1}$  в диапазоне от 1 до 5 Мгц показаны на рис. 4 треугольником. Из рисунка видно, что частотные характеристики чувствительности, снятые разными методами, совпадают.

## 6. Применение <sup>миниатюрных</sup> магнитных приемников

Прежде чем перейти к описанию применений миниатюрных приемников ультразвука, необходимо сказать, что миниатюрные приемники применялись для приема преимущественно импульсных сигналов, т. е. применялся тот же режим работы, что и при калибровке приемников. Причем, длительности импульсов выбирались такими, что стоячие волны в держателях приемников, как правило, не успевали устанавливаться. Это существенный факт, если принять во внимание жесткое соединение чувствительного элемента приемника с держателем. Кроме того, в тех случаях, где направленность приемника не играла роли, использовались приемники с изогнутыми держателями. Держатель, примерно, в средней своей части, изгибается под прямым углом. Таким образом, при вертикальном расположении переходного патрона и закрепленной в нем части держателя, конец держателя с закрепленным на нем чувствительным элементом оказывался направленным в сторону преобразователя, излучавшего ультразвук в направлении горизонтальной оси. Если приемник не изогнут и введен вертикально в горизонтальный ультразвуковой луч, сигнал принимается не только чувствительным элементом, но и держателем. Это вносит погрешность в величину и фазу принятого сигнала на 10—15%, что в некоторых случаях оказывается нежелательным.

Миниатюрные приемники ультразвука использовались для исследования полей плоских излучателей и сферических концентраторов. Миниатюрность приемников позволила рассмотреть «тонкую структуру» поля, изменение амплитуды давления в поперечном сечении ультразвукового луча и расхождение волны от плоского излучателя.

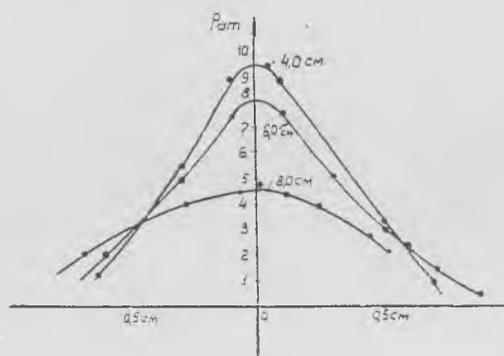


Рис. 6.

На рис. 6 представлена картина поля в разных сечениях луча. На расстояниях от излучателя  $40\text{ мм}$ ,  $60\text{ мм}$  и  $80\text{ мм}$ . Отчетливо заметно уменьшение амплитуды давления в волне и расхождение луча. По оси абсцисс отложено расстояние от оси луча. Диаметр излучателя  $1,5\text{ см}$ . Частота  $1,06\text{ Мгц}$ . Длительность импульсов  $20\text{—}30\text{ мксек}$ . Частота повторения  $50\text{ гц}$ .

Возможность получения больших амплитуд давления в волне ( $20\text{—}30\text{ ат}$ ) позволила исследовать работу как излучателя, так и приемника при таких давлениях.

На рис. 7 представлена фотография формы волны, принятой на расстоянии  $0,3\text{ см}$  от поверхности плоского излучателя.

Амплитуда давления в волне около  $30\text{ ат}$ . Частота заполнения импульса  $1,06\text{ Мгц}$ . Как излучатель, так и чувствительный элемент приемника изготовлены из керамического титаната бария. Из фотографии видно, что нелинейность работы преобразователей при давлениях в волне порядка  $30\text{ ат}$  незначительна. Исследование при более высоких амплитудах давления в волне затруднено тем, что на поверхности приемника появляется кавитация, которая разрушает покрытие приемника.

Оплавление чувствительного элемента стеклом не приводит практически к улучшению, так как кавитация в конце концов разрушает и стеклянное покрытие.

Широкополосные миниатюрные приемники ультразвука использовались для исследования распространения в жидкой среде поля большой амплитуды (амплитуды давления в волне порядка  $10\text{—}$

30 ат). Известно [Л. 5], что синусоидальный сигнал большой амплитуды при распространении в среде должен искажаться и принимать пилообразную форму вследствие нелинейных свойств среды. Спектр такого сигнала содержит вторую, третью и т. д. гармоники. Таким образом, в сигнале частоты, скажем, 1 Мгц появляются частоты 2 Мгц, 3 Мгц и т. д. Такой искаженный сигнал может быть принят только приемником, широкополосным в этой области частот.

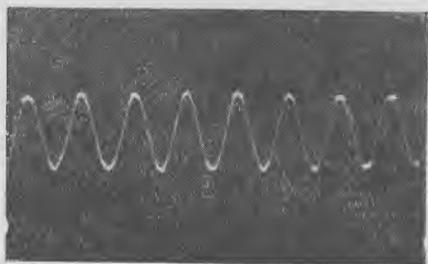


Рис. 7.

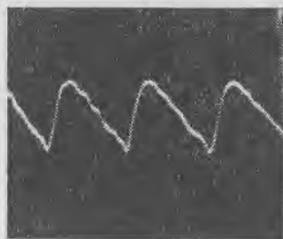


Рис. 8.

На рис. 8 приведена фотография такого искаженного сигнала частоты 1,2 Мгц, распространяющегося в воде и принятого приемником с размером чувствительного элемента 0,12 мм. Первоначально этот сигнал имел чисто синусоидальную форму. Сигнал излучался в воду в виде импульса длительностью 20 мксек с высокочастотным заполнением синусоидальной формы. В качестве излучателя использовалась пластинка из керамического титаната бария диаметром 30 мм. Амплитуда давления в волне, изображенной на фотографии около 20 ат.

После концентрирующих излучателей (цилиндрических и сферических) и фокусирующих систем имеет очень сложную форму в фокальной области. Форма поля в этом случае может быть исследована с помощью только миниатюрного приемника.

На рис. 9 приведена картина поля в фокусе сферического излучателя, снятая приемником. Акустическая волна распространяется в направлении оси X. Излучатель изготовлен из керамического титаната бария. Фокусное расстояние излучателя — 50 мм. Толщина излучателя — 1 мм. Амплитуда давления в фокусе излучателя достигала 50—60 ат, при этих давлениях на поверхности приемника начиналась кавитация. Кроме того, при больших амплитудах давления в волне, коэффициент усиления концентрирующих излучателей и фокусирующих систем оказывается существенно меньше, чем при малых амплитудах давления. Как оказалось, это связано с искажением формы волны и связанным с ним резким увеличением коэффициента поглощения.

Волна, пройдя расстояние от излучателя до фокуса, успевает принять пилообразную форму и частично поглотиться, что и приводит к существенному понижению коэффициента усиления системы. Искажение формы волны в области фокуса концентрирующих излучателей и фокусирующих систем подтвердилось измерениями с помощью миниатюрных приемников ультразвука.

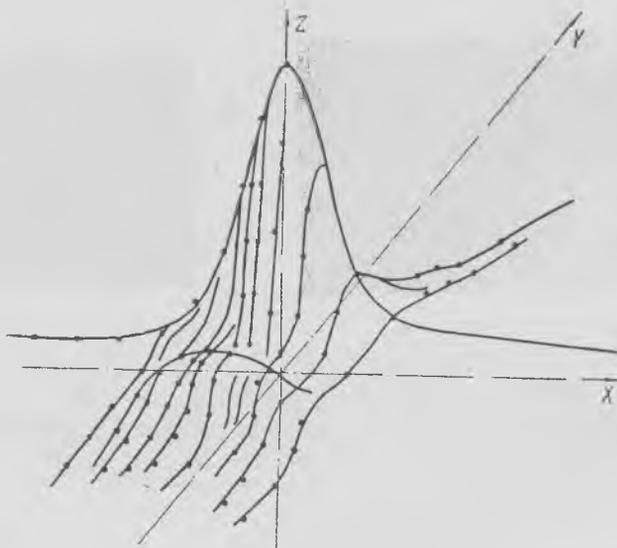


Рис. 9.

Миниатюрные широкополосные приемники ультразвука позволяют также исследовать спектр кавитационных шумов, поля рассеяния тел различной формы, влияние релаксационных явлений на форму волны большой амплитуды и ряд других вопросов, имеющих как чисто научное, так и практическое значение.

В заключение хочу выразить благодарность кандидату физ. мат. наук т. Н. А.Рою за предложенный им принцип конструкции описанных приемников, аспиранту К. А. Наугольных за участие в обсуждении полученных результатов и лаборанту Ю. М. Московенко за помощь в проведении экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Koppelman I. Beiträge zur Ultraschallmestechne in Flüssigkeiten, *Acustica*, 2, 1952.

2. Л. Бергман. Ультразвук, Издательство иностранной литературы, 1956.

3. Millen R. H., On experimental study of the collapse of a spherical cavity in water, IASA 28, 3, 1956.

4. В. А. Зверев, О возможности абсолютной калибровки излучателей и приемников звука по давлению радиации без использования радиометра. Акустический журнал, 2 (4), 1956.

5. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц, Механика сплошных сред, Москва, ГИИТЛ, 1954.