

**ПЕРЕДОВОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ОПЫТ**

**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ
УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПРИЕМНИКИ**

Тема 38
№ 11-58-169/6

1958

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ
СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР

АКАДЕМИЯ НАУК
СОЮЗА СОВЕТСКИХ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ФИЛИАЛ ВСЕСОЮЗНОГО ИНСТИТУТА
НАУЧНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

*ПЕРЕДОВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ*

Н. А. РОЙ, Е. В. РОМАНЕНКО

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ
УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПРИЕМНИКИ

№ П-58-169/6

Тема 38. Приборы для измерения акустических величин

МОСКВА

1958

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвук находит все более широкое применение при ускорении разнообразных технологических процессов. При исследовании ультразвуковых полей требуются широкополосные приемники звукового давления, имеющие малые (по сравнению с длиной волны) размеры приемной части, вводимой в исследуемое поле. При этом конфигурация поля вследствие дифракции на приемной части существенно не нарушается.

Обычно применяют приемники с пьезоэлектрическим или магнетострикционным чувствительным элементом. Эти приемники бывают двух видов: 1) с волноводом, на одном конце которого имеется чувствительный элемент, а другой конец вводится в ультразвуковое поле, и 2) с чувствительным элементом, который вводится непосредственно в исследуемое поле.

Приемники первого вида изготавливают следующим образом. В качестве волновода используют проволоку, на некотором расстоянии от приемного конца которой укрепляют чувствительный элемент, а свободный конец волновода помещают в звукопоглотитель, чтобы предотвратить возникновение стоячих волн. Боковую поверхность волновода экранируют чехлом, оставляющим свободным торец волновода.

Использование таких приемников рационально при работе в условиях кавитации или с агрессивными жидкостями. Частотная характеристика приемников этого вида ограничивается частотой, на которой длина волны в материале волновода становится сравнимой с его диаметром. В этом случае форма монохроматического сигнала может быть искажена волноводом в результате дисперсии.

Чувствительный элемент широкополосных приемников второго вида должен быть меньше длины волны и иметь сферическую или цилиндрическую симметрию в механическом и пьезоэлектрическом отношениях. Это необходимо для обеспечения одинаковой чувствительности приемника во всех направлениях (сферическая ненаправленность) или в плоскости (цилиндрическая ненаправленность). Примером несоблюдения второго требования может служить приемник с пьезоэлементом в виде куба со стороной 1 см из керамики титаната бария с электродами на двух противоположных гранях. Такой приемник на частоте 10 кгц (на которой длина волны в воде много больше чувствительного элемента) имеет ярко выраженную лепестковую характеристику направленности [1].

Для соблюдения вышеуказанных требований к симметрии чувствительных элементов, их выполняют в форме сферических и цилиндрических оболочек [2]. Наиболее широкополосный приемник этого типа имел пьезоэлемент в виде полого цилиндра из керамики титаната бария [3].

Диаметр и длина цилиндра по 1,5 мм. Приемник имел практически не зависящую от частоты чувствительность в диапазоне до 1 Мгц и круговую диаграмму направленности в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра. При дальнейшем расширении полосы частот возникают трудности, связанные с изготовлением и монтажом пьезоэлементов малого размера.

В Акустическом институте АН СССР изготовлены приемники*, имеющие круговую диаграмму направленности в плоскости, перпендикулярной оси держателя пьезоэлемента, и чувствительность от 0,001 до 0,007 мкв/бар [4]. Полоса рабочих частот приемника — до 10 Мгц. К концу рабочего диапазона неравномерность чувствительности приемника может достигать 30%.

Отличительной чертой конструкции этих приемников является то, что чувствительный элемент изготавливается не отдельно от приемника, а спекается в виде корочки непосредственно на внутреннем платиновом электроде, которому придается нужная форма. Таким способом можно изготавливать приемники с чувствительным элементом не больше 0,3 мм, имеющим чувствительность несколько тысячных микрольт на бар. В ультразвуковой технике не всегда требуются столь малые и широкополосные приемники, необходимы также приемники с более низкой верхней границей полосы, но с высокой чувствительностью.

Конструкция и технология изготовления приемников

Приемники с чувствительным элементом в виде слоя на платиновом электроде. Простым увеличением диаметра платинового электрода невозможно создать сферические приемники диаметром больше 0,3 мм. При увеличении размеров платинового электрода приходится учитывать различие коэффициентов расширения керамики и платины и усадку керамического слоя при спекании. В противном случае керамический слой после остывания покрывается трещинами. Для увеличения диаметра чувствительного элемента между платиновым электродом и спеченным керамическим титанатом бария помещают слой пористой керамики, который, деформируясь, компенсирует усадку внешнего плотного слоя керамики.

Общий вид чувствительного элемента и его держателя показан на фиг. 1. Платиновый шарик 1 диаметром до 0,35 мм оплавлен на конце платиновой проволочки 2 диаметром 0,05 мм. На шарик нанесен пористый слой 3 керамики титаната бария, на которой, в свою очередь, нанесен слой 4 плотной керамики. Шарик приварен к капилляру 5, оттянутому от стеклянной трубки 6, внутри которой проходит проволочка 2. На поверхность трубки и шарика нанесен серебряный электрод 7. Трубка заканчивается коаксиальным патроном 8 для присоединения к входу катодного повторителя. Шарик оплавляется в электрической дуге между угольными электродами. Максимальная величина шарика зависит от диаметра проволочки. На тонких проволочках не удается оплавить шарик большого диаметра, так как он отрывается от проволочки в процессе изготовления.

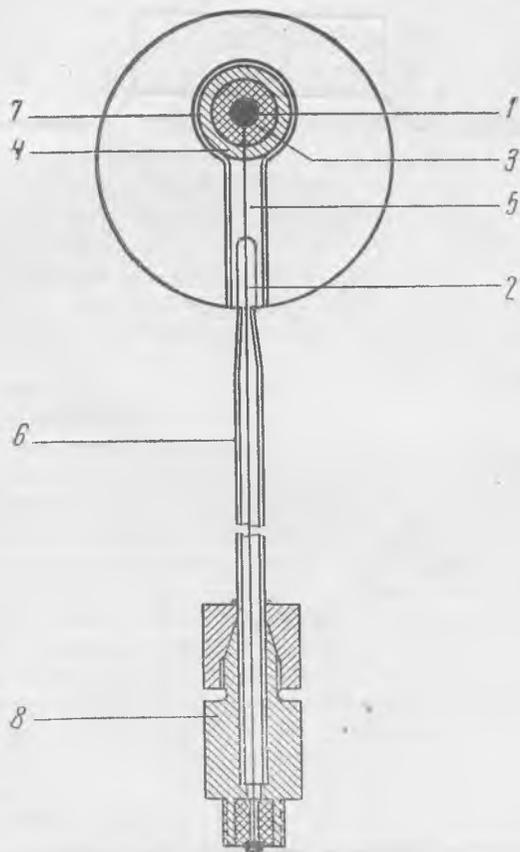
Для получения пористого слоя изготавливают сметанообразную смесь порошков титаната бария** и графита с водой. Объемная пропорция титаната бария и графита 3 : 1. Шарик многократно обмакивают в эту смесь и затем обжигают при температуре около 1000° до образования слоя толщиной около 0,1 мм. Плотный керамический слой наносят также многократным обмакиванием шарика в сметанообразную массу, образо-

* Принцип конструкции предложен Н. А. Реем.

** Диаметр зерна титаната бария 0,005—0,015 мм.

ванную размешиванием чистого порошка титаната бария в воде с последующим предварительным обжигом, для закрепления слоев на шарике. После образования шарика нужных размеров (до 1,5 мм) его окончательно обжигают в силитовой печи при температуре около 1400°.

Общий вид силитовой печи показан на фиг. 2. В средней части силитового стержня 1 диаметром около 30 мм и длиной около 200 мм на наждачном круге протачивается шейка 2 диаметром 20 мм и длиной 40 мм. В шейке силитовым стержнем выверивается углубление 3, диаметром 15 мм, в котором обжигаются шарики. На концах стержня вжиганием серебряной пасты наносятся электроды, на которые надевают обжимы 4 для подвода тока к стержню. Печь питается от понижающего трансформатора мощностью около 1 квт.

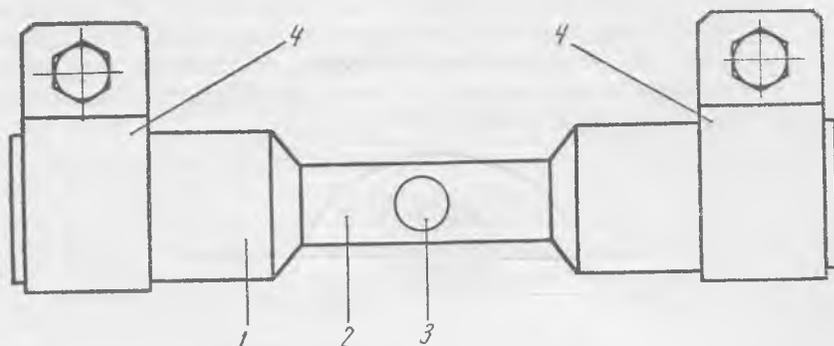


Фиг. 1. Общий вид чувствительного элемента и держателя

Обожженный шарик приваривают к торцу стеклянного капилляра в пламени бензиновой горелки. При этом необходимо следить, чтобы стекло не покрыло всей поверхности шарика. В этом случае чувствительность приемника резко падает. Внешний электрод наносят вжиганием серебряной пасты при температуре около 400°. Пасту вначале наносят на толстую часть трубки и обжигают в пламени горелки. Затем пасту наносят на капилляр и шарик и обжигают в цилиндрической электрической печи, расположенной вертикально. При недостаточной плотности слоя серебра электрическая экранировка приемника может оказаться недостаточной.

Керамический пьезоэлемент поляризуется при напряжениях электрического поля 10—15 кв/см в течение нескольких часов. На внутренний электрод следует подавать положительный потенциал. При та-

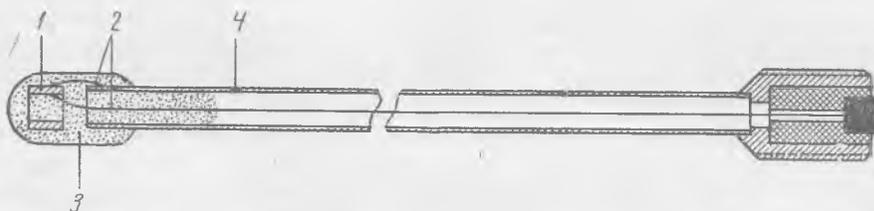
ком направлении поляризации чувствительного элемента можно использовать подполяризацию при работе с приемником. В качестве напряжения подполяризации можно использовать анодное напряжение катодного повторителя, которое подается на вход катодного повторителя через сопротивление около 1 Мом. При наличии подполяризации чувствительность приемника возрастает.



Фиг. 2. Общий вид силиковой печи

В описанной конструкции чувствительный элемент имеет жесткое соединение с держателем. Это приводит к тому, что чувствительный элемент возбуждается также и колебаниями, передающимися по держателю. Так, например, приемник, введенный в звуковое поле только держателем, дает показания, составляющие около 10% от показаний, когда чувствительный элемент также находится в звуковом поле. Наименьшее влияние держателя на показание приемника имеет место при работе в импульсном режиме, когда пространственная длина импульса в материале держателя меньше длины держателя, а также если держатель изогнут под прямым углом, причем чувствительный элемент направлен навстречу волне. В последнем случае чувствительность приемника в разных направлениях неодинакова.

Цилиндрические приемники, общий вид одного из которых показан на фиг. 3, отличаются простотой конструкции и изготовления. Основную трудность представляет изготовление полого цилиндра 1 из керамики титаната бария. Такой цилиндр можно изготовить на станке для ультразвукового сверления.



Фиг. 3. Общий вид цилиндрического ультразвукового приемника

Электроды наносят на внутреннюю и внешнюю поверхности цилиндра вжиганием серебра. Провода, подходящие к электродам 2, выполняют в виде тонких серебряных проволочек, припекаемых к керамике в процессе нанесения электродов.

Существенное влияние на частотную характеристику приемника оказывает способ соединения чувствительного элемента с держателем. Это соединение 3 должно быть акустически мягким, неспособным передавать к пьезоэлементу колебания от держателя, которые возникают в нем под действием звукового поля. Цилиндр 1 укрепляют на торце ме-

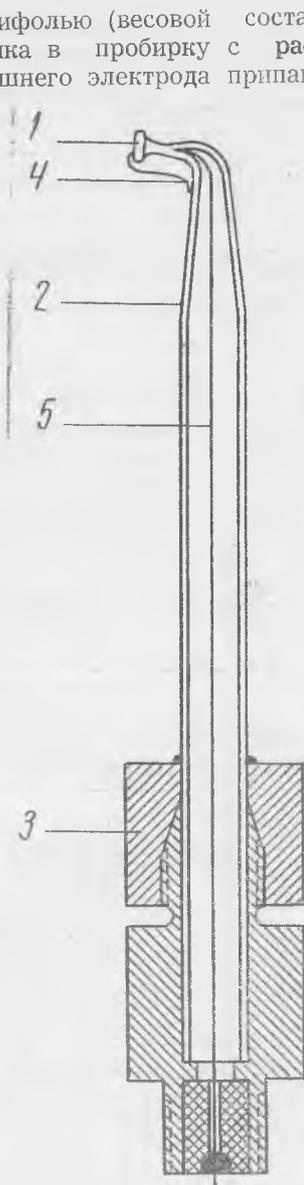
таллической трубки замазкой из воска с канифолью (весовой состав 2 : 1), обмакиванием смонтированного приемника в пробирку с расплавом замазки. При монтаже подвода от внешнего электрода припаяется к трубке 4 на расстоянии 2 мм от ее конца. Эта трубка является одновременно коаксиальным выводом. После заполнения внутренней части трубки и цилиндра замазкой получается хорошая акустическая изоляция пьезоэлемента от держателя. Изготовленный таким способом приемник с пьезоэлементом высотой 3 мм, внешним диаметром 2,5 мм и внутренним 2 мм имеет чувствительность около 0,3 мкв/бар в полосе частот до 800 кгц и емкость около 300 пф. Эти приемники применялись для записи одиночных импульсов давления с амплитудой до 30 ат, создаваемых искровым разрядом в воде.

Пластинчатые приемники. Широкополосные пластинчатые приемники наиболее просты по конструкции и в изготовлении. В отличие от предыдущих, эти приемники имеют направленные характеристики. Пластинчатые приемники выполнялись в двух вариантах. Общий вид первого варианта приемника показан на фиг. 4. Пьезоэлемент 1 укреплен замазкой на стеклянном держателе 2, снабженном коаксиальным патронем 3. Внешняя поверхность держателя металлизирована, и к ней припаян вывод 4 от одной из рабочих поверхностей пьезоэлемента. Другой вывод 5 проходит внутри трубки. После монтажа приемную часть покрывают изолирующим лаком.

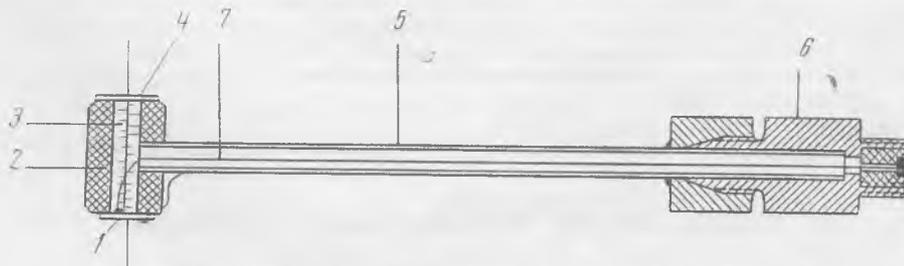
Общий вид второго варианта пластинчатого приемника показан на фиг. 5. Пьезоэлемент 1 приклеен раствором полистирола в дихлорэтане к плексигласовому полуму цилиндру 2, заполненному дистиллированной водой 3. К другому торцу цилиндра муравьиной кислотой приклеена нейлоновая планка 4. Цилиндр укреплен на держателе 5, снабженном патроном 6. Внутри держателя проходит вывод 7 от внутреннего электрода пьезоэлемента.

В обоих вариантах использованы пластинки из керамики титаната бария диаметром от 2 до 10 мм и толщиной от 0,2 до 0,35 мм.

Эти приемники имеют чувствительность около 0,2 мкв/бар.



Фиг. 4. Общий вид пластинчатого приемника (первый вариант)



Фиг. 5. Общий вид пластинчатого приемника (второй вариант)

Определение частотных характеристик приемников

Частотные характеристики приемников можно определить многими методами, в частности, по степени искажения принятого приемником акустического сигнала с широким спектром заданного состава. Таким сигналом может быть пилообразная волна, спектр которой хорошо известен,

Пилообразную волну можно получить следующим образом. Известно, что плоская синусоидальная волна с амплитудой в несколько атмосфер у излучателя по мере распространения в воде принимает пилообразную форму вследствие нелинейных эффектов [5]. Расстояние L_1 от излучателя, на котором волна становится пилообразной, определяется соотношением

$$L_1 = \frac{\lambda \rho_0 c_0^3}{\pi (k + 1) P_0} \quad (1)$$

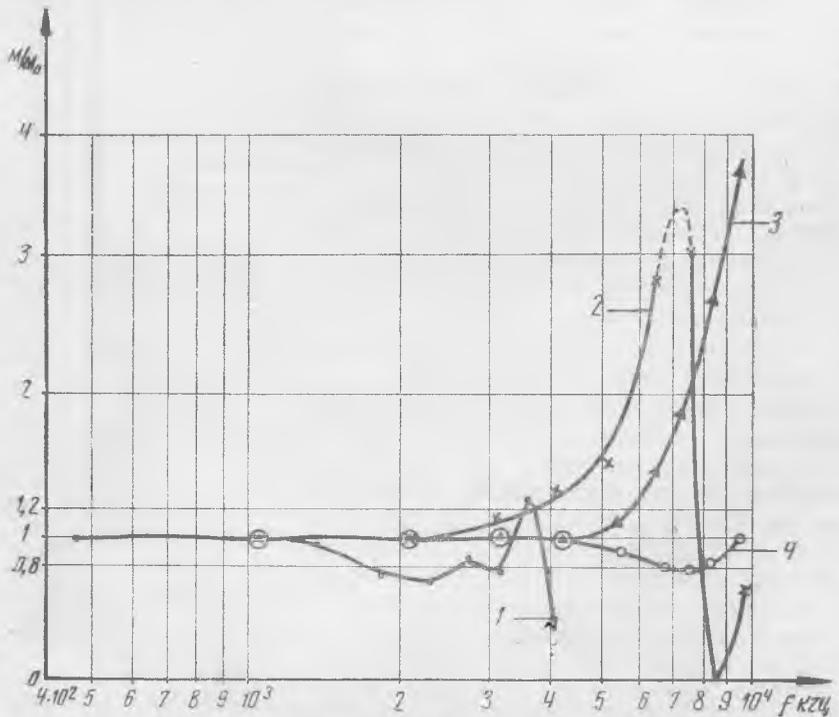
где λ — длина волны, см;

ρ_0 — массовая плотность воды, г/см³;

c_0 — скорость звука в воде, см/сек;

k — коэффициент, равный для воды 7,15;

P_0 — давление в плоской волне, ат.



Фиг. 6. Частотные характеристики ультразвуковых приемников:

- 1 — приемник с чувствительным элементом в виде керамического слоя на сферическом платиновом электроде;
- 2 — пластинчатый приемник с пластинкой диаметром 10 мм и толщиной 0,35 мм;
- 3 — пластинчатый приемник с пластинкой диаметром 10 мм и толщиной 0,22 мм;
- 4 — миниатюрный широкополосный приемник с диаметром чувствительного элемента 0,12 мм

M_0 — чувствительность приемника на частоте 1 Мгц; M — чувствительность приемника на любой другой частоте

На некотором расстоянии $\frac{D^2}{4\lambda}$ от излучателя волна становится расходящейся (здесь D — диаметр излучателя):

Чтобы соотношение (1) было справедливо, необходимо, чтобы

$$L_1 \ll \frac{D^2}{4\lambda}$$

Расчетный спектр идеальной пилообразной волны и спектр волны, ставшей пилообразной при распространении от керамического излучателя и принятой на расстоянии 12 см миниатюрным приемником с размером чувствительного элемента около 0,12 мм, приведен в таблице. Диаметр излучателя 3 см, собственная частота 1,1 Мгц.

Номер гармоники	2	3	4	5	6	7	8
Содержание гармоник в идеальной пилообразной волне, %	50	33	25	20	16,7	14,3	12,5
Содержание гармоник в акустической пилообразной волне, %	47	33	25,7	17,2	13,3	10	10

Амплитуда давления в волне около 20 ат. Режим работы импульсный с длительностью импульсов 30 мксек. и частотой повторения 50 гц.

Сняв форму напряжения с приемника, находящегося в поле пилообразной волны, определив ее спектральный состав и сравнив его со спектральным составом идеальной пилообразной волны, можно сразу определить частотную характеристику приемника.

На фиг. 6 показаны частотные характеристики ультразвуковых приемников.

Калибровка приемников

Для калибровки можно применить метод, основанный на изучении спада амплитуды пилообразной волны в зависимости от расстояния до данной точки с известным давлением.

Распространяющаяся волна не обязательно должна быть плоской, но закон убывания амплитуды волны должен выражаться соотношением

$$\frac{P_x}{P_0} = \left(\frac{x_0}{x} \right)^a, \quad (2)$$

где P_x — амплитуда давления в точке с координатой x ;

x_0 — координата начальной точки, амплитуда давления в которой P_0 ;

x — расстояние от излучателя;

a — постоянная, принимающая значения от 0 до 1, при которых волна становится, соответственно, плоской и сферической.

Например, от излучателя диаметром 2 см с рабочей частотой 1,1 Мгц волна расходится по закону $\frac{P_x}{P_0} = \left(\frac{x_0}{x} \right)^{0,82}$, начиная с $x_0 = 6$ см и примерно до 40 см.

Практически калибровку можно производить в следующей последовательности.

Для нахождения рабочего участка необходимо определить экспериментально и построить графически зависимость $\ln \frac{P_x}{P_0}$ от $\ln \frac{x}{x_0}$ на малых интенсивностях излучения порядка 10^{-3} вт/см², когда нелинейные эффекты, приводящие к повышенному поглощению, не сказываются. Далее на графике надо определить прямолинейный участок и найти для этого участка величину a , которая равна тангенсу угла наклона прямой. Построить номограмму кривых для ряда значений, выражающих зависимость $\ln \frac{P_x}{P_0}$

от $\ln \frac{x}{x_0}$, используя выражение

$$\frac{P_x}{P_0} = \frac{1}{1 + \frac{(k+1) P_0 f x_0^a (x^{1-a} - x_0^{1-a})}{\rho_0 c_0^3 (1-a)}} \cdot \left(\frac{x}{x_0}\right)^{-a} \quad (3)$$

где k — коэффициент, равный 7,15 для воды;

f — частота, Гц;

ρ_0 — массовая плотность воды, г/см³;

c_0 — скорость звука в воде, см/сек;

x — расстояние от излучателя, см.

Затем повысить амплитуду излучения, чтобы на расстоянии от излучателя $L_1 = \frac{D^2}{4\lambda}$ образовалась пилообразная волна, и снова снять характеристику изменения амплитуды волны с расстоянием на участке, где $a = \text{const}$. Построить график зависимости $\ln \frac{P_x}{P_0}$ от $\ln \frac{x}{x_0}$ и по номограмме, применяя интерполяцию, найти соответствующее значение P_0 . Тем самым поле излучателя будет измерено.

Кривые, выражающие зависимость $\ln \frac{P_x}{P_0}$ от $\ln \frac{x}{x_0}$ в определенных пределах значений x_0 , $\frac{x}{x_0}$, P_0 и a , имеют касательные, наклон которых мало зависит от $\ln \frac{x}{x_0}$, поэтому эти кривые можно заменить прямыми, описываемыми уравнением

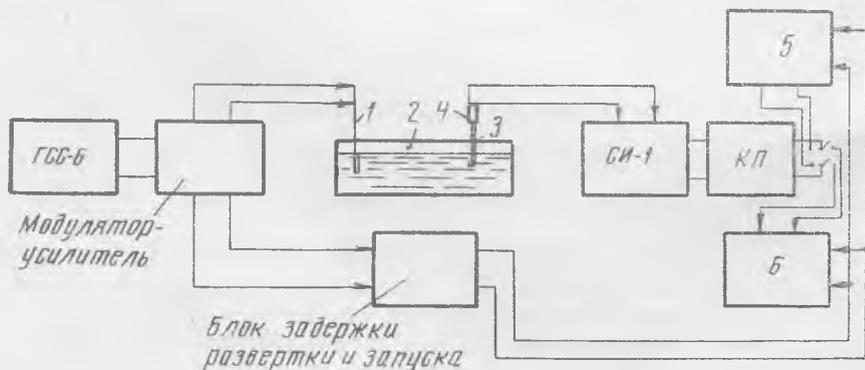
$$\ln \frac{P_x}{P_0} = \left[\frac{(k+1) P_0 f x_0^a}{\rho_0 c_0^3} + a \right] \ln \frac{x}{x_0} \quad (4)$$

Прямая, описываемая уравнением (4), уклоняется от соответствующей точной кривой, описываемой уравнением (3), не более чем на 20%, если $P_0 \leq 30$ ат, $x_0 = 10$ см, $\frac{x}{x_0} = 2,7$, $1-a = 0,2$.

При уменьшении любого из указанных параметров уклонение уменьшается.

Установка для калибровки ультразвуковых приемников

Для определения частотных характеристик приемников и их калибровки использовалась установка, блок-схема которой показана на фиг. 7.



Фиг. 7. Блок-схема установки для калибровки ультразвуковых приемников

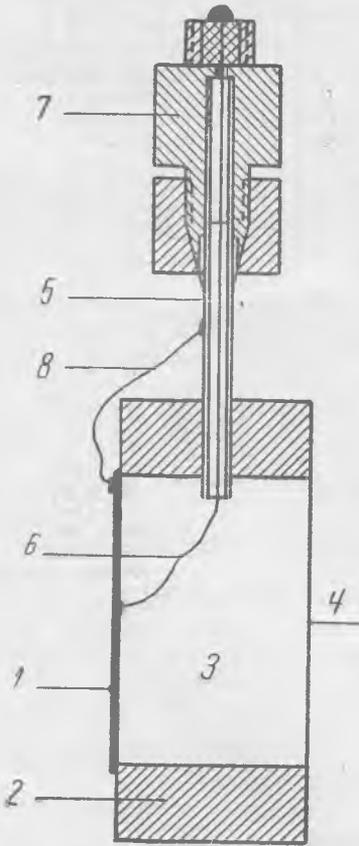
Напряжение от генератора ГСС-6 преобразуется в модуляторе-усилителе в радиоимпульсы длительностью 20—200 мксек. и частотой пов-

торения от 5 до 50 гц, которые затем усиливаются и подаются на пьезоизлучатель 1. Волна от излучателя распространяется в воде, заполняющей ванну 2, и принимается приемником 3. Принятый акустический сигнал через согласующий катодный повторитель 4, широкополосный усилитель осциллографа СИ-1 и, второй согласующий катодный повторитель КП подается на осциллографы 5 и 6.

Осциллограф 6 служит для контроля за юстировкой приемника в поле излучателя, а с экрана осциллографа 5 фотографируется усиленный акустический сигнал. Блок задержки позволяет наблюдать на экранах осциллографов акустический сигнал, задержанный на время до 1,5 мсек. относительно электрического сигнала на излучателе. Приемная аппаратура имеет полосу пропускания до 10 Мгц и линейную фазовую характеристику в этом диапазоне частот.

Принципиальная схема модулятора-усилителя представлена на фиг. 8.

В узел формирования прямоугольных видеоимпульсов входят лампы Л₁—Л₆.



Фиг. 9. Общий вид ультразвукового излучателя

есть переключателем П₁. Выпрямитель сконструирован таким образом, что позволяет питать некоторые лампы (Л₁₀, Л₁₁, Л₁₂) как постоянным, так и переменным током. Питание ламп переменным током в импульсном режиме облегчает режим ламп и выпрямителя.

Режим выпрямителя изменяется переключателями П₂ и П₃.

Схема позволяет получать в диапазоне 0,45—2,5 Мгц акустические интенсивности, измеряемые сотнями ватт на кв. см в импульсе. Излучатели обычно работают в режиме одностороннего излучения.

Напряжение от сети через трансформатор Тр₁, и фазовращающую цепь подается на вход лампы Л₁ и далее на сетку лампы Л₂, которые усиливают и ограничивают сигнал, превращая синусоидальную форму напряжения в прямоугольную. Дифференцированные прямоугольные импульсы запускают несимметричный мультивибратор Л₃. Частота повторения импульсов, выдаваемых мультивибратором, делится при помощи ламп Л₄ и Л₅. Импульсы, появляющиеся на выходе тиратрона Л₅, запускают несимметричный мультивибратор Л₆, на выходе которого появляются импульсы прямоугольной формы с переменной длительностью, переменной частотой повторения и переменной фазой относительно сетевого напряжения.

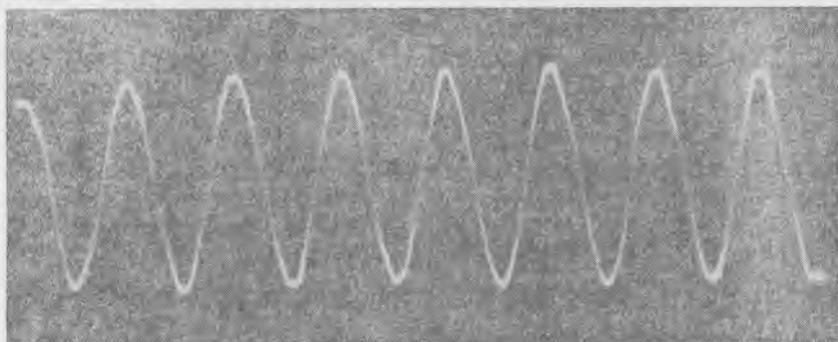
Лампа Л₇ превращает видеоимпульсы в радиоимпульсы.

Лампы Л₈—Л₁₁ усиливают радиоимпульсы по напряжению и предварительно по мощности. На выходе модулятора-усилителя стоит лампа Л₁₂, которая может работать как в импульсном, так и в непрерывном режиме. В импульсном режиме лампа опирается только на время импульса. Запирающее напряжение формируется при помощи лампы Л₁₃. Нагрузкой лампы Л₁₂ служит настраивающийся контур. Излучатель включается в контур.

Перевод схемы из импульсного режима в непрерывный осуществляется

Общий вид ультразвукового излучателя показан на фиг. 9. Конструктивно излучатели выполняют в виде круглых пластинок 1 из керамики титаната бария, вклеенных замазкой в плексигласовые держатели 2. Держатель имеет воздушную полость 3, заклеенную плексигласовой пластинкой 4. Латунная трубка 5, внутри которой проходит проволочка 6, припаянная к одному из электродов пластинки, соединяет плексигласовый держатель с коаксиальным патроном 7. Второй электрод пластинки проволочкой 8 соединяется непосредственно с трубкой, имеющей отрицательный контакт с патроном.

Как показал опыт, приемники и излучатели из керамики титаната бария имеют линейную амплитудную характеристику при интенсивностях излучения до $400-500$ вт/см² в импульсном режиме.



Фиг. 10. Оциллограмма акустического сигнала

На фиг. 10 показана оциллограмма акустического сигнала принятого в воде на расстоянии 0,3 см от излучателя при интенсивности излучения около 500 вт/см². Излучателем служила пластинка из титаната бария диаметром 2 см с рабочей частотой 1,1 Мгц. Использовался миниатюрный широкополосный приемник с чувствительным элементом из керамики титана бария.

Изучение работы приемников и излучателей на более высоких интенсивностях затруднено тем, что на поверхности приемника появляется кавитация.

Обмоточные данные трансформаторов и дросселей (см. фиг. 8)

Тр₁ сердечник из пластин Ш-16, набор 15 мм; I обмотка 5000 витков ПЭЛ-0,06, II — 2000 витков ПЭЛ-0,09.

Тр₂ сердечник из пластин Ш-20, набор 30 мм; I обмотка 1000 витков ПЭЛ-0,2, II — 2500 витков ПЭЛ-0,1.

Тр₃ сердечник из пластин Ш-40, набор 80 мм; I обмотка 260 витков ПЭЛ-1,2, II — 3000 витков ПЭЛ-0,4, III — 3,5 витка ПБО-2,5, IV — 15 витков ПБО-2.

Тр₄ сердечник из пластин Ш-40, набор 70 мм; I обмотка 360 витков ПЭЛ-1, II — 1000 витков ПЭ-0,6, III — 4,5 витка ПБО-2,5.

Тр₅ сердечник из пластин Ш-45, набор 50 мм; I обмотка 470 витков ПЭЛ-0,8, II — 2000 витков ПЭЛ-0,5, III — 15 витков ПБО-2; IV — 12 витков ПБО-2.

В качестве дросселей Др₁, Др₂, Др₃ использованы дроссели фильтра от телевизора КВН-49.

Поступило 16/V 1958 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьева А. А. Приемники звука из керамики титаната бария, Отчет, Акустический ин-т АН СССР, 1955.
2. Григорьев В. С., Ананьева А. А. Разработка ненаправленного звукоприемника для ультразвуковых частот. Отчет. Акустический ин-т АН СССР, 1951.
3. Бергман Л. Ультразвук. ИЛ, М., 1956.
4. Романенко Е. В. Миниатюрные пьезоэлектрические приемники ультразвука. «Акустический журнал», 1957, т. III, вып. 4.
5. Гольдберг З. А. О распространении плоских волн конечной амплитуды «Акустический журнал», 1957 г., т. III, вып. 4.