

ФИЗИКА И ТЕХНИКА  
МОЩНОГО УЛЬТРАЗВУКА

---

ИСТОЧНИКИ  
МОЩНОГО  
УЛЬТРАЗВУКА

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
АКУСТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ФИЗИКА И ТЕХНИКА МОЩНОГО УЛЬТРАЗВУКА

# ИСТОЧНИКИ МОЩНОГО УЛЬТРАЗВУКА

ПОД РЕДАКЦИЕЙ  
проф. Л. Д. РОЗЕНБЕРГА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
МОСКВА 1967

Монография «Физика и техника мощного ультразвука», написанная коллективом авторов под редакцией проф. Л. Д. Розенберга отражает современное состояние физических основ промышленного применения мощных ультразвуковых колебаний. В основу положены оригинальные исследования, выполненные в последние годы советскими учеными, а также достижения зарубежной науки.

Монография, состоит из трех книг: «Источники мощного ультразвука», «Мощные ультразвуковые поля» и «Физические основы ультразвуковой технологии». Каждая книга имеет самостоятельное значение и может быть использована независимо от остальных.

В настоящей, первой книге «Источники мощного ультразвука» изложены теория, расчет и результаты исследования ультразвуковых воздушных свистков, фокусирующих излучателей, ферритовых преобразователей, крутильных колебательных систем, вопросы передачи звуковой энергии в обрабатываемую среду, а также измерения интенсивных ультразвуковых колебаний.

Вторая и третья книги в настоящее время готовятся к изданию.

Монография рассчитана на широкий круг читателей—научных работников, инженеров, конструкторов и технологов, работающих в области исследования и применения мощных ультразвуковых колебаний.

ЧАСТЬ VII

**ПРИЕМНИКИ УЛЬТРАЗВУКА  
И МЕТОДЫ ИХ ГРАДУИРОВКИ**

*Е. В. Романенко*

## Часть VII

### О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение . . . . .	329
Глава 1. Ультразвуковые приемники . . . . .	331
§ 1. Сверхминиатюрные и миниатюрные широкополосные пьезоэлектрические приемники ультразвука . . . . .	331
§ 2. Магнитострикционные и пьезоэлектрические резонансные приемники ультразвука . . . . .	341
§ 3. Волноводные щупы . . . . .	347
§ 4. Приемники с механической трансформацией ультразвукового давления . . . . .	349
§ 5. Радиометры . . . . .	354
Глава 2. Градуировка ультразвуковых приемников . . . . .	360
§ 1. Использование явления искажения формы волны конечной амплитуды . . . . .	361
§ 2. Метод, основанный на измерении радиационного давления . . . . .	367
§ 3. Абсолютная градуировка с помощью ударной волны . . . . .	369
§ 4. Сброс статического давления . . . . .	372
§ 5. Гидростатический метод . . . . .	374
§ 6. Метод топографической съемки . . . . .	375
Литература . . . . .	377

## ВВЕДЕНИЕ

Оценка эффективности использования интенсивных ультразвуковых колебаний в технологических процессах невозможна без измерения параметров ультразвукового поля. Иногда для оценки эффективности достаточно измерить только интенсивность ультразвуковых волн. В других случаях необходимо измерять звуковое давление, радиационное давление, форму волны или какой-нибудь другой параметр поля. Однако во всех случаях невозможно обойтись без измерительной аппаратуры, градуированной должным образом.

Под названием измерительная аппаратура здесь понимается весь комплекс приборов, позволяющий представить тот или иной параметр поля либо в виде осциллограммы, либо в виде численного значения, отсчитанного по шкале индикатора. Основным элементом такого комплекса приборов является чувствительный элемент, непосредственно реагирующий на параметр поля, подлежащий измерению. В зависимости от метода измерений это может быть, например, световой луч (в оптическом методе), объем жидкости или твердого тела, нагреваемый в результате поглощения энергии ультразвуковых колебаний (в калориметрическом и термоэлектрическом методах), пьезоэлектрик и магнитострикционный элемент, отражающая (поглощающая) пластинка или сфера (в радиометрическом методе) и т. д.

Можно назвать пять основных методов измерения характеристик ультразвуковых полей: 1) основанный на использовании пьезоэлектрических и магнитострикционных чувствительных элементов, 2) оптический, 3) калориметрический, 4) термоэлектрический, 5) радиометрический.

Характерной особенностью первых двух методов является то, что они позволяют измерять мгновенные значения таких параметров ультразвукового поля, как звуковое давление, колебательная скорость, амплитуда смещения. Иначе говоря, эти методы дают возможность регистрировать форму ультразвуковой волны. Третий, четвертый и пятый методы характерны тем, что с их помощью можно измерять лишь квадратичный параметр поля, которым является энергия волны. Регистрация формы волны этими методами невозможна.

Каждый из методов имеет свои положительные и отрицательные свойства.

1. Пьезоэлектрические и магнитострикционные чувствительные элементы практически безынерционны, позволяют измерять мгновенные значения ультразвукового давления как в непрерывном, так и в импульсном режимах работы, в оптически прозрачных и непрозрачных жидкостях. Амплитудная характеристика чувствительных элементов линейна вплоть до ультразвуковых давлений, измеряемых десятками атмосфер. При достаточно малых размерах элементов их можно использовать для анализа формы волны и структуры поля ультразвуковых волн. Основной недостаток использования пьезоэлектрических и магнитострикционных

элементов заключается в том, что введение их в поле в большей или меньшей степени искажает последнее. Характер и степень искажения зависят от формы и размеров приемников и легко могут быть оценены [44]. Кроме того, применение таких элементов для измерений в активных жидкостях и в кавитирующем поле требует специальных мер защиты от разрушения.

2. Оптический метод основан на наблюдении изменений показателя преломления жидкости, возникающих вследствие периодических изменений плотности в ультразвуковой волне [7, 8]. Основным преимуществом этого метода является то, что в ультразвуковое поле не вводится постороннее тело, которое могло бы исказить поле. Этот метод безынерционен и позволяет в известной степени анализировать форму волны.

Однако оптический метод пригоден для проведения измерений только в прозрачных средах при непрерывном режиме работы излучателя. Кроме того, осуществление оптического метода требует довольно сложной оптической установки, абсолютная градуировка которой довольно затруднительна.

3. Калориметрический метод, основанный на наблюдении интегрального эффекта нагревания рабочего объема жидкости в сосуде Дьюара, дает возможность измерять интенсивность ультразвуковых волн [1]. Однако калориметры инерционны и не позволяют исследовать форму поля и волн. Кроме того, чувствительность приемных устройств, используемых в калориметрическом методе, является функцией частоты и амплитуды. Калориметры еще в большей степени, чем пьезоэлектрические и магнитоэлектрические чувствительные элементы, искажают поле.

4. Термоэлектрический метод основан на наблюдении эффекта нагревания твердой оболочки термодпары вследствие поглощения в ней энергии ультразвуковых волн [2]. С его помощью можно измерять интенсивность ультразвуковых колебаний, однако термодпары, так же как и калориметры, инерционны и чувствительность их зависит от частоты и амплитуды волны.

5. Радиометрический метод основан на измерении радиационного давления в поле ультразвуковых волн [3, 4]. Радиационное же давление однозначно связано с интенсивностью волн. Этот метод прост, не требует сложных радиотехнических устройств и вполне надежен. В тех случаях, когда требуется оценить, например, кавитационную эффективность ультразвукового поля, он может оказаться незаменимым [5, 6]. Если радиометр имеет малые размеры, то с его помощью можно изучать форму поля.

Однако радиометрический метод не позволяет исследовать форму ультразвуковых волн. Введение радиометра в поле в той или иной мере искажает это поле. Кроме того, чувствительность радиометра зависит от формы волны.

Из всех перечисленных методов наиболее практичными и вполне надежными следует признать метод, основанный на применении пьезоэлектрических и магнитоэлектрических чувствительных элементов, и радиометрический метод. Они, как правило, дают возможность решать весь круг задач, которые ставит практика использования интенсивных ультразвуковых колебаний в технологических целях.

В гл. 1 описаны конструкции пьезоэлектрических и магнитоэлектрических приемников и радиометров, разработанные в Акустическом институте АН СССР и в большинстве случаев нашедшие применение в производственной и научно-исследовательской практике.

В гл. 2 дано описание методов градуировки ультразвуковых приемников и излучателей, применявшихся в Институте.

Градуировка ультразвуковых преобразователей представляет собой необходимый и чрезвычайно важный аспект измерительной техники. Однако опыт показывает, что в ряде случаев легче изготовить преобразова-

тель, чем должным образом градуировать его. Трудности, связанные с градуировкой, не всегда успешно преодолеваются, что может привести к грубым ошибкам и ложным выводам.

Современная метрология нуждается в простых и надежных методах градуировки. Именно поэтому мы уделили серьезное внимание вопросам градуировки преобразователей и предлагаем вниманию читателей несколько оригинальных и простых методов.

## Глава 1

### УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ПРИЕМНИКИ

Для решения разнообразных задач по измерениям параметров ультразвукового поля в Акустическом институте АН СССР разработано несколько типов приемников ультразвука и радиометров:

- 1) сверхминиатюрные и миниатюрные широкополосные пьезоэлектрические приемники ультразвука для работы в диапазоне высоких ультразвуковых частот (от десятков *кГц* до десятков *МГц*);
- 2) пьезоэлектрические и магнитострикционные резонансные приемники ультразвука для работы в диапазоне частот от единиц до десятков *кГц*;
- 3) волноводные пьезоэлектрические щупы для работы в активных средах и при наличии кавитации в диапазоне частот от десятков до сотен *кГц*;
- 4) пьезоэлектрические приемники звука с механической трансформацией звукового давления для работы в диапазоне частот от единиц *Гц* до десятков *кГц*;
- 5) радиометры.

#### § 1. Сверхминиатюрные и миниатюрные широкополосные пьезоэлектрические приемники ультразвука

В научно-исследовательской и производственной практике иногда бывает необходимо регистрировать без искажения ультразвуковые сигналы сложной формы, которые характеризуются более или менее широким частотным спектром. Эта задача может быть решена с помощью широкополосного миниатюрного приемника ультразвука с акустически жестким чувствительным элементом. Широкополосным приемник должен быть для того, чтобы без искажений передать частотный спектр сигнала, миниатюрным — для того, чтобы исследовать форму сигнала в определенных точках поля, а не в сечении ультразвукового пучка (как это имеет место при использовании широкополосных кварцевых пластинок). Жесткость чувствительного элемента приемника необходима для регистрации без искажений амплитуды и давления волны. Приемник ультразвука может считаться широкополосным, если его чувствительность не зависит от частоты и фазовая характеристика линейна в рабочем диапазоне частот, а миниатюрным — если его размеры пренебрежимо малы по сравнению с длиной волны в среде или, в отдельных случаях, с размерами неоднородностей поля. Требование линейности фазовой характеристики широкополосного приемника совершенно необходимо, если нужно сохранить форму принимаемого широкополосного ультразвукового сигнала, так как



форма сигнала в большой степени зависит от соотношения фаз его частотных компонент.

При разработке миниатюрных и широкополосных приемников ультразвука пришлось идти по пути усовершенствования приемников с пьезоэлектрическим чувствительным элементом [12—16], так как чувствительность других типов приемников (электромагнитного, электродинамического, магнитострикционного и др.) зависит от частоты <sup>1</sup>.

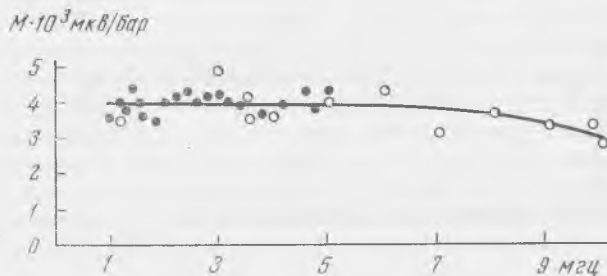


Рис. 1. Частотная характеристика сверхминиатюрного приемника ультразвука

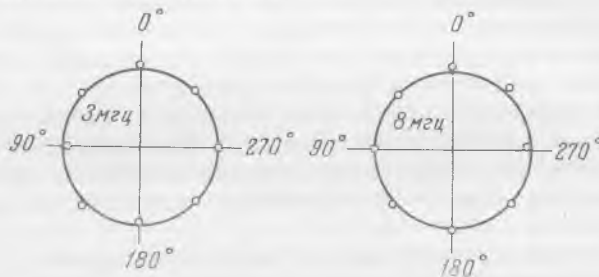


Рис. 2. Диаграмма направленности сверхминиатюрного приемника в плоскости, перпендикулярной оси держателя

В результате были созданы сверхминиатюрные сферические приемники ультразвука с чувствительным элементом размером 0,1—0,2 мм [12,14,15]. Чувствительность такого приемника порядка 0,001—0,01 мкв/бар. Частотная характеристика горизонтальная до частот около 10 МГц при неравномерности не более 30%. В низкочастотном диапазоне частотная характеристика определяется соотношением внутреннего емкостного сопротивления чувствительного элемента и входного сопротивления

<sup>1</sup> Здесь имеется в виду чувствительность, определяемая отношением  $U/p$ , где  $U$  — электрическое напряжение на выходе приемника, обусловленное звуковым давлением  $p$  волны. Вообще говоря, более полную характеристику приемника дает так называемая удельная чувствительность, определяемая как  $U/p\sqrt{Z}$ , где  $Z$  — импеданс приемника.

Дело в том, что приемник ультразвука — это преобразователь акустической энергии в электрическую, и коэффициент преобразования равен отношению электрической энергии на выходе приемника к энергии звукового поля:

$$K = \frac{U^2}{Z} \frac{\rho c}{p^2}.$$

Из этой формулы видно, что качество приемника ультразвука как преобразователя определяется не только отношением  $U/p$ , но и соотношением импеданса приемника  $Z$  и акустического сопротивления среды  $\rho c$ .

Однако общепринято характеризовать приемник ультразвука чувствительностью в виде отношения  $U/p$ . Мы не будем отступать от этого правила и лишь в одном случае, когда будем описывать магнитострикционные приемники (§ 2), приведем в качестве примера наряду с обычной чувствительностью и удельную чувствительность.

схемы, к которой подключен приемник. При достаточно высоком входном сопротивлении схемы частотная характеристика может быть горизонтальной от десятков  $гц$ .

На рис. 1 и 2 показаны соответственно частотная характеристика и диаграмма направленности одного из таких сверхминиатюрных приемников.

В экспериментальной практике не всегда бывают необходимы столь сверхминиатюрные и широкополосные приемники, тем более, что чувствительность их чрезвычайно мала. Часто бывает нужно иметь приемник с чувствительностью на один-два порядка выше при больших размерах чувствительного элемента и меньшей полосе равномерно принимаемых частот. В соответствии с такими требованиями был разработан ряд конструкций сферических, цилиндрических и плоских миниатюрных приемников ультразвука, чувствительность которых заключена в пределах от 0,01 до 3,0  $мкв/бар$  при размерах чувствительного элемента от 0,3 до 6  $мм$ .

Частотная характеристика такого типа приемников, как правило, имеет максимум в диапазоне частот от 100  $кгц$  до 5—6  $Мгц$  в зависимости от размеров чувствительного элемента.

Рассмотрим некоторые конструкции сверхминиатюрных и миниатюрных пьезоэлектрических приемников ультразвука.

На рис. 3 схематически изображена конструкция сверхминиатюрного приемника ультразвука<sup>1</sup>.

Чувствительный элемент приемника 1 выполнен в виде сферического слоя из керамики титаната бария толщиной около 0,05  $мм$ , нанесенного на платиновый шарик 2, оплавленный на конце платиновой проволоки 3 диаметром 0,05  $мм$ . 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.

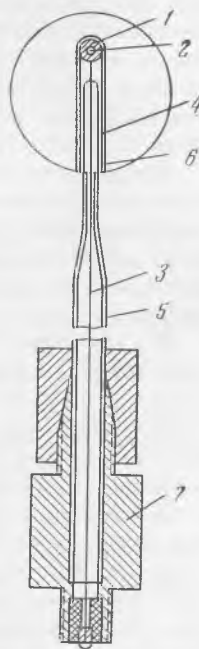


Рис. 3. Схема сверхминиатюрного приемника ультразвука

На рис. 4, а приведена фотография чувствительного элемента приемника с частью держателя (сильно увеличено), а на рис. 4, б — фотография приемника.

Конструкция этого приемника отличается тем, что пьезоэлемент изготавливается не отдельно, а спекается непосредственно на внутреннем электроде. Материалом для внутреннего электрода выбрана платина, которая способна выдержать температуру спекания титаната бария (1380°), не окисляется при этой температуре и практически не реагирует с титанатом бария, и, наконец, обладает сравнительно малым удельным сопротивлением, что важно при малой толщине проволоки.

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

Указанным способом могут быть изготовлены приемники с чувствительным элементом размером около 0,1—0,2  $мм$ . Создать чувствительный

<sup>1</sup> Принцип конструкции приемника предложен Н. А. Роем.

элемент большего размера простым увеличением диаметра платинового шарика и толщины слоя керамики оказалось невозможно, ввиду того что слой керамики после спекания в результате усадки растрескивался. Для увеличения диаметра чувствительного элемента между платиновым электродом и спеченным керамическим титанатом бария пришлось расположить слой пористой керамики, который, деформируясь, компенсирует усадку внешнего плотного слоя керамики.

Конструкция чувствительного элемента 1 с пористым слоем (рис. 5) аналогична конструкции сверхминиатюрного приемника (рис. 3); различие заключается в том, что между платиновым шариком 2 и слоем плотной керамики 4 нанесен слой пористой керамики 5. Технология создания пористого слоя подробно изложена в работе [15].

Использование пористого переходного слоя позволяет изготовить приемники с чувствительным элементом, размером до 3 мм. Чувствительность их на порядок больше, чем у описанных сверхминиатюрных приемников, а полоса принимаемых частот составляет 0,8—3 Мгц.

В описанных конструкциях приемников чувствительный элемент имеет жесткое соединение с держателем. Это приводит к тому, что чувствительный элемент возбуждается также колебаниями, передающимися по держателю. Так, например, приемник, введенный в звуковое поле только держателем, дает показания, составляющие около 10% показаний, получаемых при введении чувствительного элемента в звуковое поле. Влияние держателя на показания приемника наименьшее при работе в импульсном режиме, когда пространственная длина импульса в материале держателя меньше длины держателя и если держатель изогнут под прямым углом, причем чувствительный элемент направлен навстречу волне. В этом случае, правда, приемник имеет некруговую диаграмму направленности.

Сверхминиатюрные приемники ультразвука имеют целый ряд особенностей, на которые следует обратить внимание при их практическом использовании.

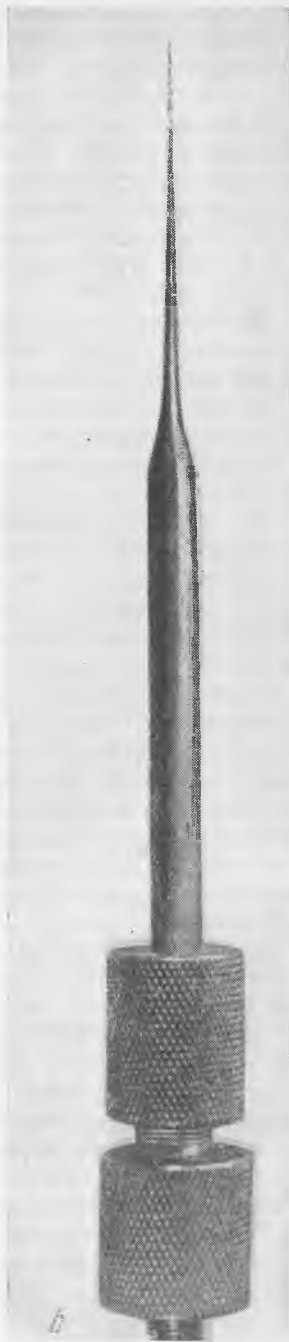
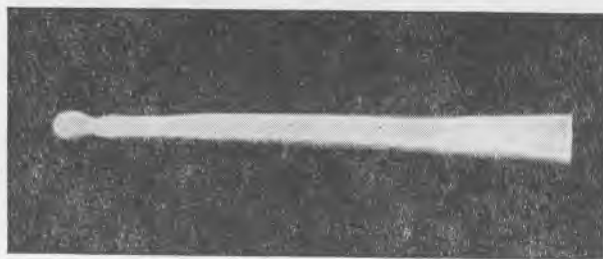


Рис. 4. Чувствительный элемент приемника ультразвука с частью держателя (а) и сверхминиатюрный приемник ультразвука (б)

Из опыта работы с приемниками известно, что широкополосными до 8—10 *Мгц* являются только приемники, размер чувствительного элемента которых не превышает 0,15—0,20 *мм*. Если размеры чувствительного элемента больше, — горизонтальный участок характеристики уменьшается.

Ввиду того, что слой керамики чувствительного элемента порист, он иногда пропитывается рабочей жидкостью, а это приводит к нестабильности частотной и фазовой характеристик приемников. Поэтому чувствительный элемент приемника должен быть тщательно покрыт непромокаемым и нерастворимым лаком или тонким слоем краски.

Чтобы увеличить чувствительность приемников во время работы, можно применять подполяризацию чувствительного элемента. Для этого анодное напряжение (все или только часть, в зависимости от размеров чувствительного элемента) катодного повторителя, к которому обычно подключается приемник, через сопротивление порядка 1 *Мом* подается на вход катодного повторителя, который во время измерений кондуктивно связан с внутренним электродом приемника.

Конструкция силитовой печи, в которой производился обжиг описанных выше пьезоэлементов, показана на рис. 6. 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 высверливается углубление 3 диаметром 15 *мм*, в котором обжигаются шарики. На концах стержня вжиганием серебряной пасты наносятся электроды, на которые надеваются обжимы 4 для подвода тока к стержню. Печь питается от понижающего трансформатора мощностью около 1 *квт*.

Сферические приемники ультразвука с чувствительным элементом размером 2 *мм* и более изготавливались по технологии, отличной от описанной. В этом случае сферический пьезоэлемент составлялся из двух керамических полусфер (1 на рис. 7, а), изготавливаемых каждая отдельно на шлифовальном станке.

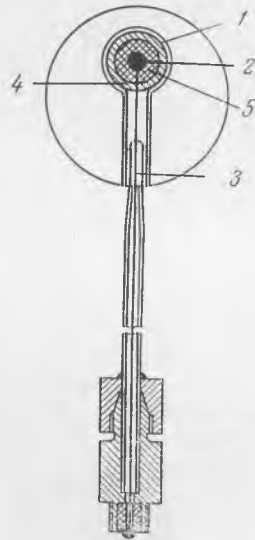


Рис. 5. Схема сверхминиатюрного приемника ультразвука с пористым слоем керамики

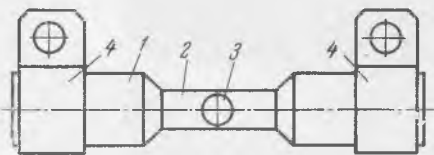


Рис. 6. Схема силитовой печи

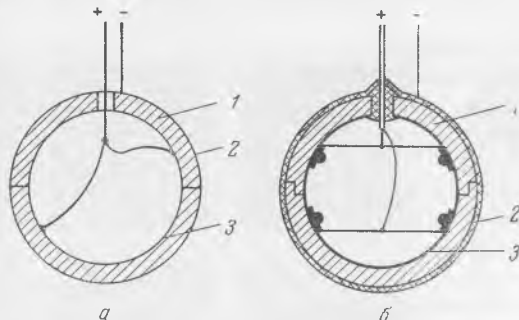
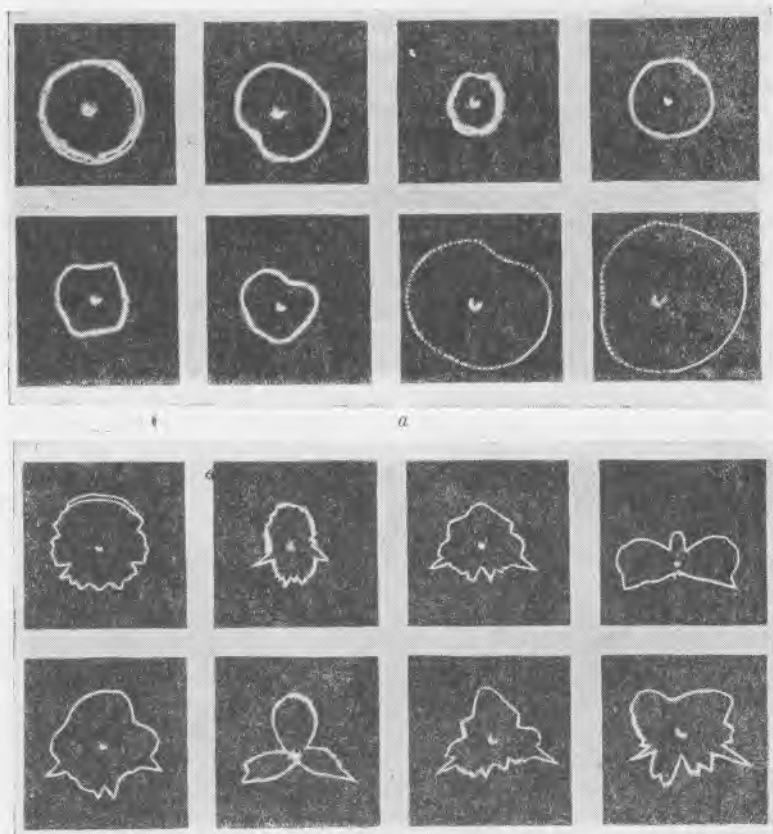


Рис. 7. Схема сферического пьезоэлемента

Полусферы обрабатывались с точностью 0,05 — 0,1 *мм*. Электроды 2 и 3 наносились на внутреннюю и внешнюю поверхности полусфер двукратным или трехкратным вжиганием серебра. Полусферы при сборке соединялись с помощью сварки стеклом. Вывод проводника от внутреннего электрода осуществлялся через стеклянный изолятор, вваренный в отверстие в одной из полусфер. Для более надежной защиты от влаги весь сферический элемент еще целиком покрывался стеклоэмалью. Схематический разрез сферического звукоприемника приведен на рис. 7, б.



Рис. 8. Набор сферических приемников ультразвука



б

Рис. 9. Характеристики направленности в экваториальной (а) и меридиональной (б) плоскости приемника ультразвука с жестким креплением чувствительного сферического элемента

На частотах 15, 66, 83, 100, 140, 167, 185 и 196 кгц

На рис. 8 показан набор измерительных сферических звукоприемников с пьезоэлементами описанной конструкции. Измеренная статическая чувствительность таких приемников при внешнем диаметре 15 мм составляет 1,34 мкв/бар, при диаметре 30 мм — 2,9 мкв/бар, при диаметре 50 мм — 7,9 мкв/бар.



Рис. 10. Схема простейшего цилиндрического приемника ультразвука

На рис. 9 приведены характеристики направленности в экваториальной (а) и меридиональной (б) плоскостях приемника ультразвука с жестким креплением чувствительного элемента. Внешний диаметр сферы 15 мм. Как и следовало ожидать, характеристика направленности в меридиональной плоскости сильно искажается держателем сферы. Более подробные сведения о конструктивном оформлении такого типа приемников и их акустических параметрах можно найти в книге А. А. Ананьевой [17].

Кроме сферических приемников ультразвука, разработаны миниатюрные приемники с цилиндрическими и плоскими чувствительными элементами из керамики титаната бария [12, 13, 15].

Одна из простейших конструкций приемника ультразвука с цилиндрическим чувствительным элементом показана на рис. 10. Полый цилиндр из керамики титаната бария 1 с серебряными электродами, нанесенными на внутреннюю и наружную поверхности цилиндра, с помощью серебряных проводников 2 соединяется с внутренним и наружным проводниками коаксиального держателя 4. Цилиндр 1 укрепляют на торце металлической трубки с помощью замазки 3 из воска с канифолью, для чего смонтированный приемник опускают в пробирку с расплавом замазки. Замазка, кроме того, является хорошей акустической изоляцией пьезоэлемента от держателя.

Серебряные электроды наносят на внутреннюю и внешнюю поверхности цилиндра методом вжигания серебра. Проводники 2 прикрепляются к электродам путем припекания к керамике в процессе нанесения электродов.

Основную трудность представляет изготовление полого цилиндра 1 из керамики титаната бария. Такой цилиндр может быть изготовлен на станке для ультразвукового сверления. Однако при наличии некоторого опыта работы с керамикой вполне удовлетворительные цилиндры можно изготовить и без ультразвукового станка. В этом случае в прессованных заготовках из сырой массы титаната бария просверливают

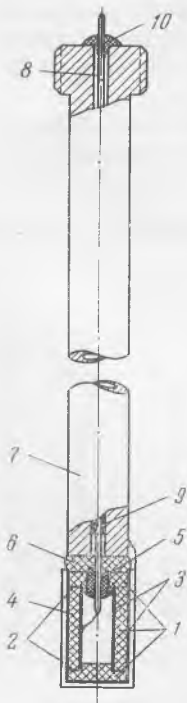


Рис. 11. Схема цилиндрического приемника ультразвука с размером чувствительного элемента от 3 до 6 мм

1 — пьезоэлемент с торцевыми шайбами из керамики титаната бария; 2 — сварка стеклом; 3 — внешняя и внутренняя металлизация; 4 — внешнее покрытие стеклоэмалью; 5 — стеклянный проходной изолятор; 6 — резиновая прокладка; 7 — трубка-держатель; 8 — стержневой проводник; 9 — изолятор в трубке-держателе; 10 — склейка карбиноловым клеем



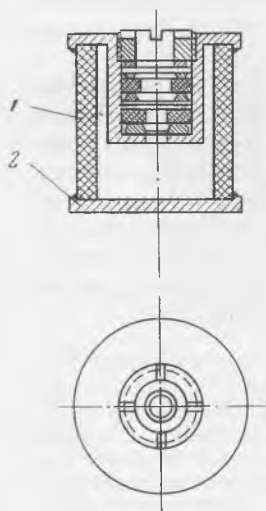
Рис. 12. Элементы цилиндрического приемника ультразвука в процессе сборки

обычными сверлами отверстия нужного диаметра, после чего заготовки спекаются по известной технологии.

С помощью фарфоровых трубок с внутренним и наружным диаметрами соответственно около 4 и 6 мм на сверлильном станке из керамических заготовок вышлифовываются столбики с высверленными ранее отверстиями в центре. Таким образом получают заготовки будущих цилиндров. Из этих заготовок вручную с помощью надфилей и наждачной бумаги можно выточить цилиндры, вполне пригодные для изготовления приемников ультразвука. Таким способом удавалось изготавливать цилиндры с внутренним диаметром около 0,5 мм, наружным диаметром 1 мм и высотой 1,5 мм.

Приемник ультразвука с цилиндрическим чувствительным элементом 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.

Цилиндрические приемники ультразвука с диаметром пьезоэлемента от 3 до 6 мм более сложны по конструкции. На рис. 11 приведена схема такого приемника.



◀ Рис. 13. Цилиндрический приемник ультразвука с размером чувствительного элемента больше 6 мм

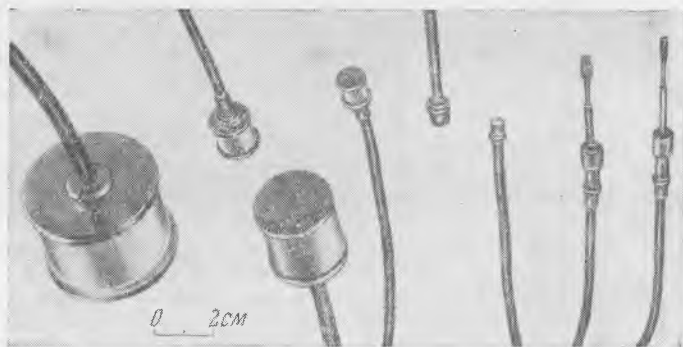


Рис. 14. Набор цилиндрических приемников ультразвука

Таблица 1

## Параметры цилиндрических приемников ультразвука

Наружный диаметр цилиндра, мм	Высота цилиндра, мм	Толщина стенки, мм	Емкость, пф	Статическая чувствительность, мв/бар	Частота первого резонанса, кгц
52	40	3,0	15 000	8,4	20
30	30	1,5	23 000	7,0	50
15	12	1,0	4 500	3,0	100
10	10	1,0	3 000	2,0	150
8	8	0,5	3 500		
6	6	0,5	1 000	0,8	200

На рис. 12 показаны элементы приемника в процессе сборки. Приемники этого типа предназначены для целей фонокардиографии.

Цилиндрические приемники более крупных размеров монтировались способом, который приведен на рис. 13. Здесь использован цилиндрический радиально поляризованный чувствительный элемент 1, торцы которого закрыты жесткими пластинами 2 (металлическими или керамическими), воспринимающими ультразвуковое давление. В одной из торцевых пластин имеется отверстие для ввода кабеля, которое герметизировано сальником, расположенным во внутренней цилиндрической полости приемника. На рис. 14 дана серия приемников этого типа. Параметры их приведены в табл. 1.

Более подробные сведения о различных конструктивных вариантах и параметрах цилиндрических приемников можно найти в книге А. А. Анарьевой [17]. Что же касается характеристик направленности таких

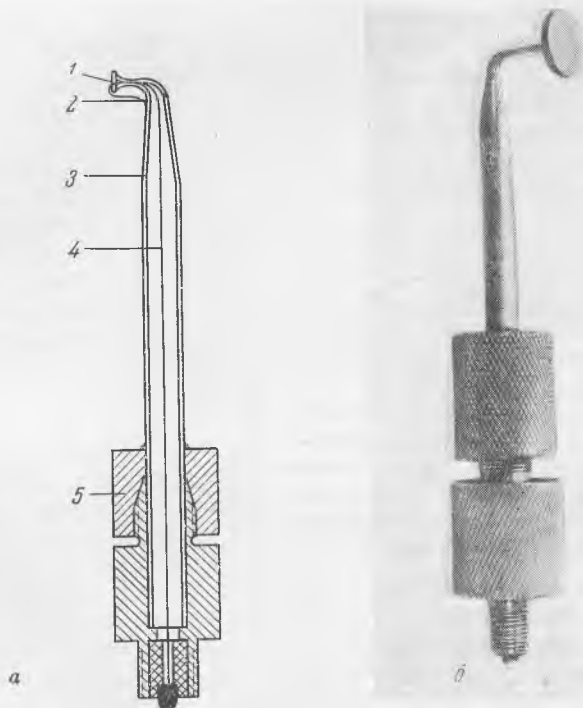


Рис. 15. Пластичатый приемник ультразвука (первый вариант)  
а — схема; б — общий вид



приемников ультразвука, то они подобны характеристикам направленности сферических приемников (см. рис. 9), однако их неравномерность в плоскости, в которой находится держатель приемника, выражена сильнее ввиду отсутствия сферической симметрии самого чувствительного элемента в этой плоскости.

В ряде практических случаев нашли применение приемники ультразвука с чувствительным элементом в виде пластинки. Такие приемники

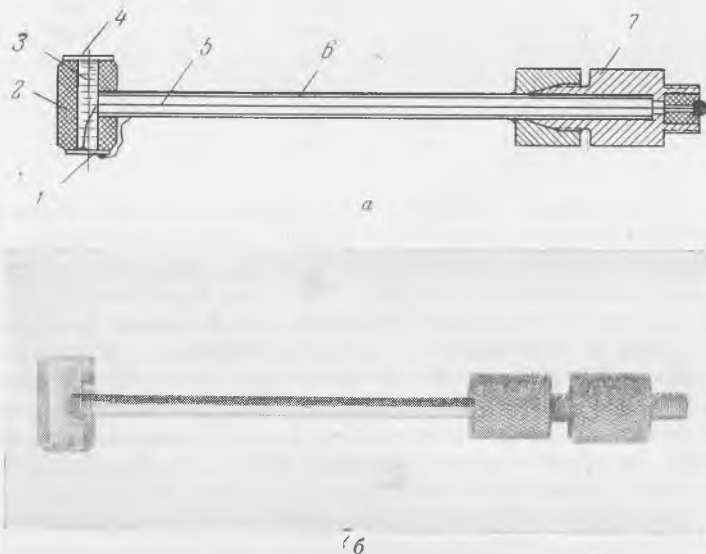


Рис. 16. Пластинчатый приемник ультразвука (второй вариант)  
а — схема; б — общий вид

наиболее просты по конструкции и в изготовлении. Они имеют направленные характеристики в плоскости, перпендикулярной к поверхности пластинки. Пластинчатые приемники выполнялись в двух вариантах. Конструкция первого варианта приемника показана на рис. 15, а. Пьезоэлемент 1 укреплен замазкой из смеси воска и канифоли на стеклянном держателе 3, снабженном коаксиальным патроном 5. Держатель изогнут

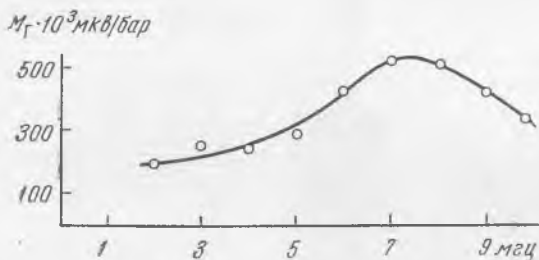


Рис. 17. Частотная характеристика пластинчатого приемника ультразвука (первый вариант)

под прямым углом, чтобы максимум диаграммы направленности был обращен в сторону излучателя. Внешняя поверхность держателя 3 металлизирована и к ней припаян вывод 2 от одной из рабочих поверхностей пьезоэлемента. Другой вывод 4 проходит внутри трубки. После монтажа приемную часть покрывают изолирующим лаком.

Конструкция второго варианта приемника с чувствительным элементом в виде пластинки показана на рис. 16, а. Пьезоэлемент 1 приклеен раствором полистирола в дихлорэтане к плексигласовому полому цилиндру 2, заполненному дистиллированной водой 3. К другому торцу цилиндра муравьиной кислотой приклеена нейлоновая пленка 4. Цилиндр укреплен на держателе 6, снабженном патроном 7. Внутри держателя проходит вывод 5 от внутреннего электрода пьезоэлемента.

В обоих вариантах в качестве пьезоэлементов использованы пластинки из керамики титаната бария диаметром от 2 до 10 мм и толщиной от 0,2 до 0,35 мм. Чувствительность этих приемников около 0,2 мкв/бар, причем она не зависит от частоты в диапазоне до 4—6 Мгц.

На рис. 17 показана частотная характеристика чувствительности пластинчатого приемника первого типа. Диаметр приемной пластинки 0,2 см, толщина 0,02 см, чувствительность в дорезонансной области частот около 0,2 мкв/бар.

## § 2. Магнитострикционные и пьезоэлектрические резонансные приемники ультразвука

Нередко в производственной и исследовательской практике возникает необходимость проводить измерения не в широкой полосе частот, а на некоторых фиксированных частотах. В частности, процессы очистки деталей с помощью ультразвука, эмульгирование и т. д. производятся, как правило, в узком интервале частот. В таких случаях измерять параметры ультразвукового поля удобнее с помощью резонансных приемников ультразвука, обладающих, в отличие от широкополосных, более высокой чувствительностью.

Для приема ультразвуковых волн в жидких и твердых средах в области частот от 10—20 до 80 кгц широко применяются магнитострикционные преобразователи. Их достоинство — малое собственное сопротивление, что приводит к увеличению удельной чувствительности и позволяет не учитывать шунтирующее действие кабеля. Кроме того, магнитострикционные преобразователи, выполненные из феррита, устойчивы против коррозии в химически активных средах, а также имеют высокое значение температуры Кюри (температура Кюри для феррита никеля около 590° С). Эти свойства магнитострикционных (в частности, ферритовых) преобразователей делают их незаменимыми в ряде технологических процессов. Поэтому были разработаны два типа конструкций приемников ультразвука из феррита никеля [18—20].

Приемники первого типа имели резонансную частоту между 30 и 40 кгц и чувствительность в резонансе около 8—15 мкв/бар. Приемники второго типа имели резонансную частоту около 65 кгц и чувствительность 5—8 мкв/бар.

Приемник первого типа состоит из ферритового сердечника (рис. 18), на поверхность которого наматывается обмотка около 40 витков из провода с хлорвиниловой изоляцией. Сердечники находились в состоянии остаточной намагниченности, причем предварительное намагничивание производилось полем 25 э. Изготовление ферритов проводилось по технологии, обеспечивающей большую плотность, чем плотность обычных ферритов, применяемых для радиотехнических целей. Сердечники приемников ультразвука изготавливались из никель-цинковых ферритов четырех составов. Для характеристики материалов приведем их плотность  $\rho$

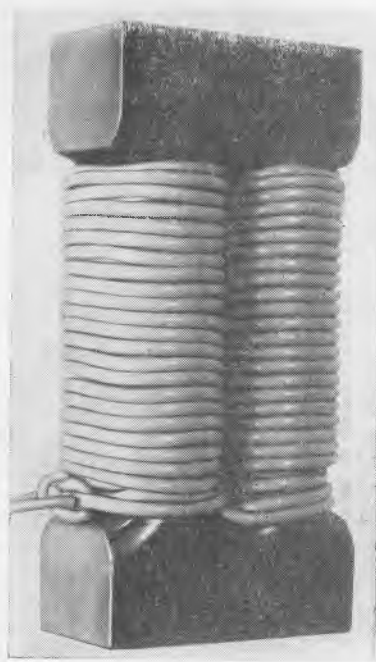


Рис. 18. Конструкция ферритового приемника ультразвука первого типа

$\gamma$ , мкв/бар

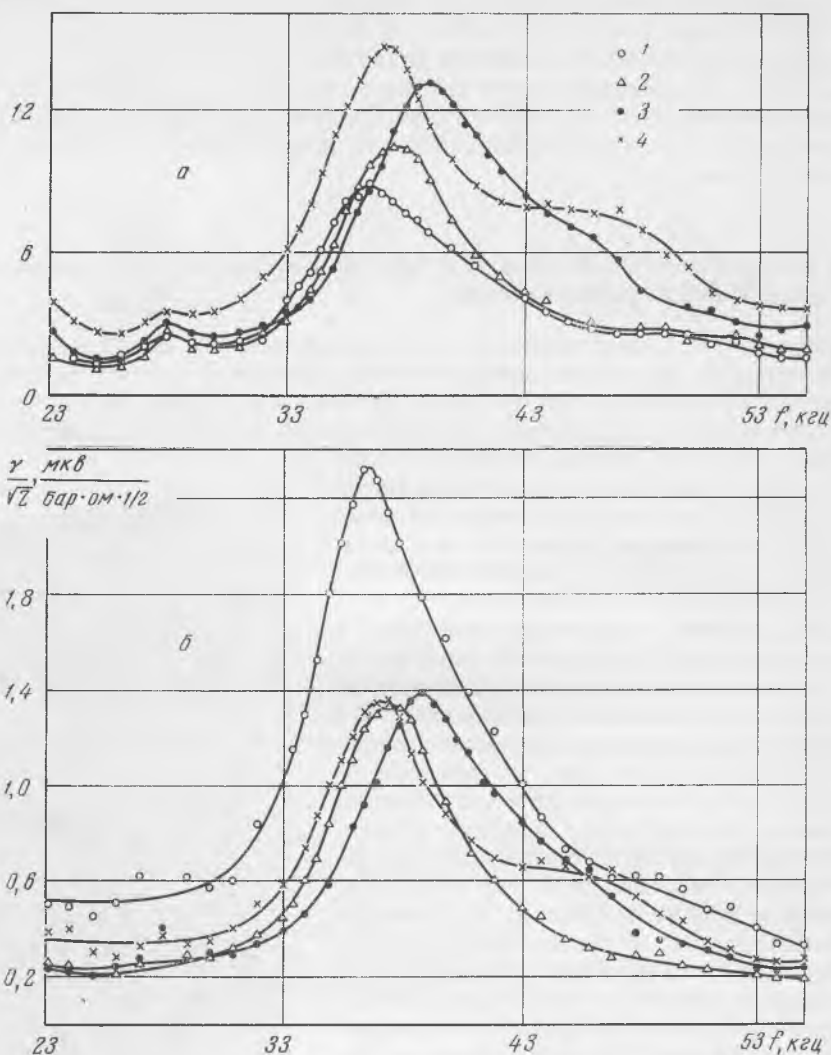


Рис. 19. Зависимость от частоты чувствительности (а) и удельной чувствительности (б) ферритового приемника первого типа

1 — феррит никеля,  $\rho = 4,95$ ;  $\mu = 29$ ; 2 — никель-цинковый феррит с 20% феррита цинка,  $\rho = 4,98$ ;  $\mu = 50$ ; 3 — то же, с 30% феррита цинка,  $\rho = 5,12$ ,  $\mu = 130$ ; 4 — то же, с 50% феррита цинка,  $\rho = 5,16$ ;  $\mu = 236$

и начальную магнитную проницаемость. Феррит никеля имел  $\rho = 4,95$  и  $\mu = 29$ , никель-цинковые ферриты с содержанием феррита цинка: при 20%  $\rho = 4,98$ ,  $\mu = 50$ ; при 30%  $\rho = 5,12$ ,  $\mu = 130$ ; при 50%  $\rho = 5,16$ ,  $\mu = 236$ . Применение еще более плотных ферритов давало некоторое повышение чувствительности.

На рис. 19, а показана зависимость чувствительности приемников этого типа от частоты, а на рис. 19, б — удельная чувствительность для тех же приемников, т. е. чувствительность, отнесенная к квадратному корню из электрического импеданса. Сравнение обеих частей рис. 19 показывает, что чувствительность холостого хода растет с увеличением содержания феррита цинка (что определяется в основном большим увеличением магнитной проницаемости). Максимальная же удельная чувстви-

ность для приемников с ферритом цинка мало зависит от содержания последнего и меньше чувствительности приемника из феррита никеля.

Было проведено сравнение удельной чувствительности на резонансе приемника из феррита никеля и приемника из металлического никеля, имевших одну и ту же форму и размеры. Никелевый приемник был набран из пластин никеля марки Н-1 толщиной 0,1 мм.

На рис. 20 приведены значения отношения возникающей в ультразвуковом поле э.д.с. к квадратному корню из импеданса в зависимости от величины напряженности магнитного поля в режиме подмагничивания и от величины

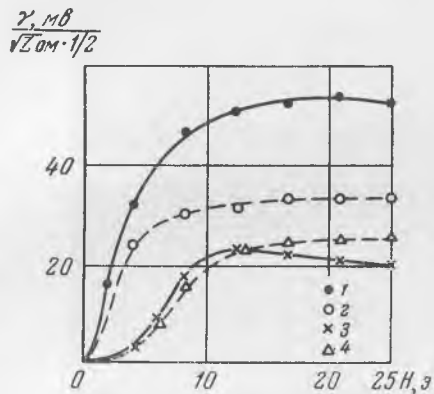


Рис. 20. Зависимость удельной чувствительности приемников от величины напряженности магнитного поля подмагничивания

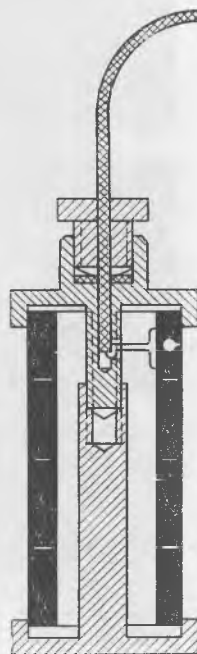


Рис. 21. Схема цилиндрического приемника ультразвука из феррита

предварительно подававшегося магнитного поля в режиме остаточной намагниченности для этих двух приемников.

Видно, что при подмагничивании постоянным полем удельная чувствительность никелевого приемника в 2,3 раза выше, чем у приемника из феррита, а при остаточной намагниченности отношение чувствительностей составляет всего 1,3.

После того как испытания описанных простейших стержневых приемников ультразвука из ферритов дали положительные результаты, была

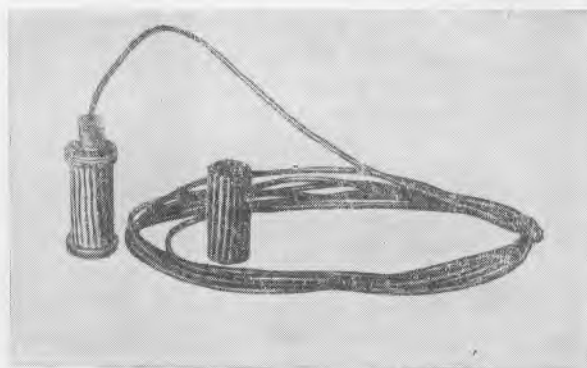


Рис. 22. Сердечник с обмоткой и собранный цилиндрический приемник ультразвука из феррита

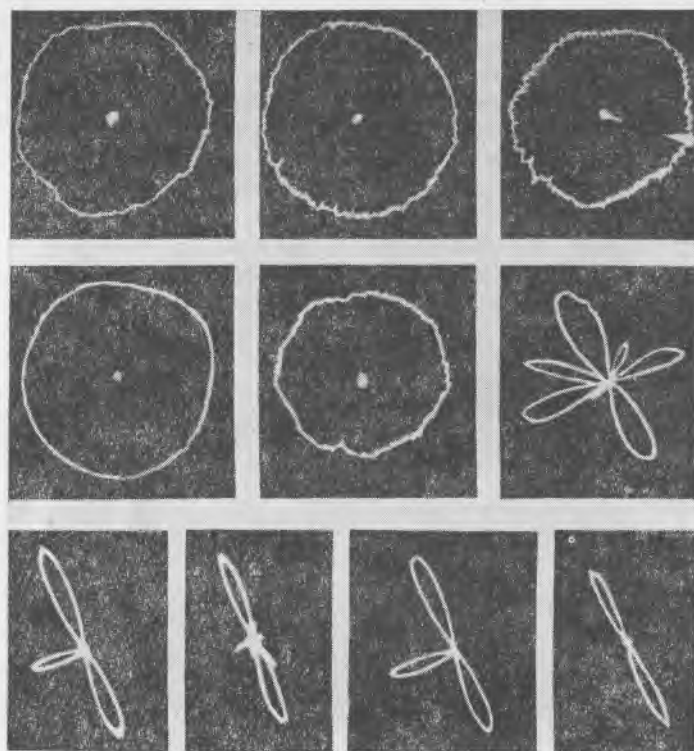


Рис. 23. Характеристики направленности цилиндрических приемников из феррита

На частотах 25, 35, 61, 71, и 92  $\text{кГц}$  в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра, и в плоскости, проходящей через ось,

создана конструкция второго типа приемников, в которой использовалось высокое удельное электрическое сопротивление ферритов. В этой конструкции применялась обмотка, нанесенная путем вжигания серебра непосредственно на поверхность феррита. При такой «обмотке» уменьшается магнитный поток рассеяния, увеличивается механическая добротность преобразователей, а если приемник должен обладать круговой характеристикой направленности, — увеличивается ее равномерность.

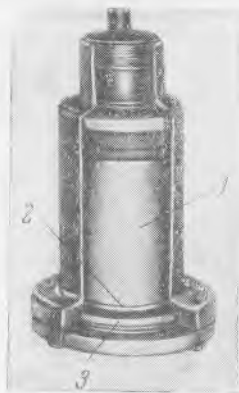


Рис. 24. Конструкция резонансного приемника ультразвука с цилиндрическим пьезоэлементом



Рис. 25. Цилиндрический пьезоэлемент

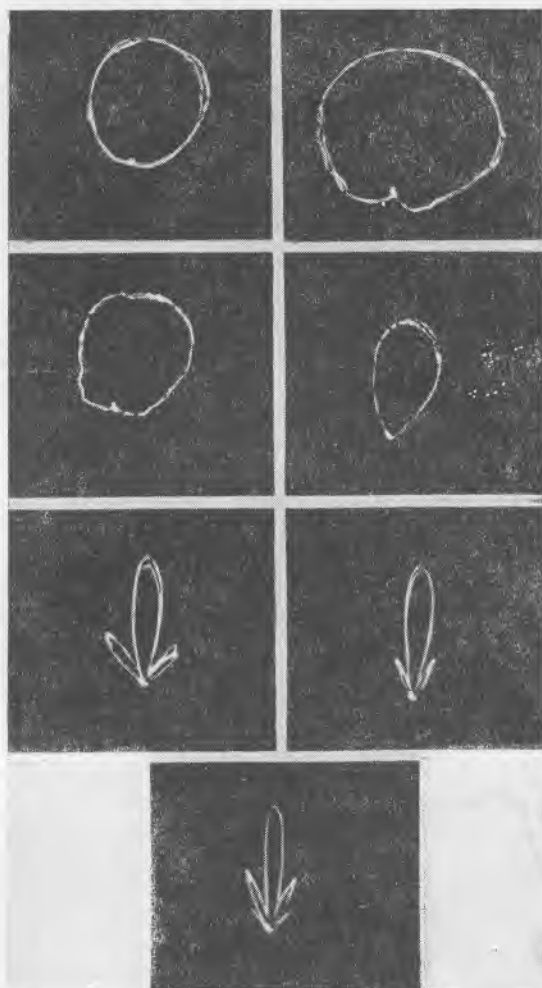


Рис. 26. Характеристики направленности резонансного приемника ультразвука с цилиндрическим пьезоэлементом

На частотах 10, 15, 30, 50, 100, 150 и 250 кГц

Схема цилиндрического приемника такого типа представлена на рис. 21.

Сердечник приемника составлен из 4—5 ферритовых цилиндров, средний диаметр которых 28 мм, толщина стенки 3—4 мм, а высота 15—20 мм. Эти цилиндры одновременно пришлифовывались по наружной и внутренней поверхности и затем сваривались между собой стеклом, в результате чего получался цилиндр высотой 60—70 мм. Затем серебряной пастой наносилась тороидальная обмотка (обычно из 20 витков), после чего серебро вжигалось при 600—700°. При трехкратном нанесении слоя пасты активное сопротивление такой обмотки составляло 2—3 ом. При помощи дополнительного покрытия пастой можно было довести сопротивление до 0,5 ом. Применение дополнительного гальванического покрытия позволяет увеличить толщину обмотки до величины, достаточной для пропускания значительных токов.

Ввиду малого сопротивления «обмотки», она не шунтировалась водой: электрический импеданс цилиндра вне резонанса имел неизменное значение при измерениях в воде и воздухе, и с этой точки зрения не требова-

лось специальных устройств для изоляции концов кабеля и всей «обмотки» от воды. Но для улучшения акустических свойств приемника применялось крепление его на кабеле с помощью сальника, не допускающее проникновения воды внутрь цилиндра. Сердечник приклеивался по концам наружной цилиндрической поверхности к арматуре из плексигласа.

$M, \text{мкв/бар}$

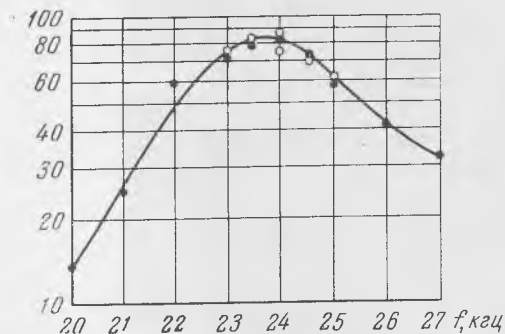


Рис. 27. Частотная характеристика чувствительности резонансного приемника ультразвука с цилиндрическим пьезоэлементом

Кабель, проходящий через сальник, припаивался внутри цилиндра к концам обмотки. При сборке приемников применялся клей на основе эпоксидных смол.

Сердечник с обмоткой, нанесенной по методу вжигания серебра, и собранный приемник показаны на рис. 22. Приемники изготовлялись из ферритов никеля и никель-цинковых ферритов с содержанием феррита цинка 20, 30 и 50%.



Рис. 28. Конструкция резонансного приемника ультразвука с «мозаикой»

Диаграмма направленности такого приемника в плоскости, перпендикулярной к оси цилиндра, должна быть круговой в диапазоне дорезонансных частот, ввиду его цилиндрической симметрии. В плоскости же, проходящей через ось цилиндра, диаграмма направленности должна быть некруговой. Это подтверждается рис. 23, на котором представлены характеристики направленности приемника, снятые в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра (диаграммы с 1 по 5), и в плоскости, проходящей через эту ось (диаграммы с 6 по 10), на частотах 25, 35, 61, 71 и 92 кГц.

В ряде случаев, особенно в измерительной технике, нашли применение несколько вариантов пьезоэлектрических резонансных приемников ультразвука. Мы здесь кратко опишем только некоторые из них. (Более подробные сведения можно найти в книге А. А. Ананьевой [17].)

На рис. 24 показана конструкция резонансного приемника ультразвука с цилиндрическим пьезоэлементом 1 из керамики титаната бария и плоской приемной диафрагмой 2. Часть корпуса вырезана, чтобы пока-

зять внутреннее устройство. Резиновое уплотняющее кольцо 3 охватывает диафрагму 2 по внешнему краю, пьезоэлемент имеет радиальную поляризацию.

На рис. 25 показан отдельно пьезоэлемент для такого звукоприемника, но для случая продольной поляризации. Диафрагма 1 выполнена тоже из керамики и закрывает одну из торцовых поверхностей цилиндра, серебряные электроды 3 нанесены на внешнюю боковую поверхность керамического цилиндра 2 в виде двухзаходной винтовой линии.

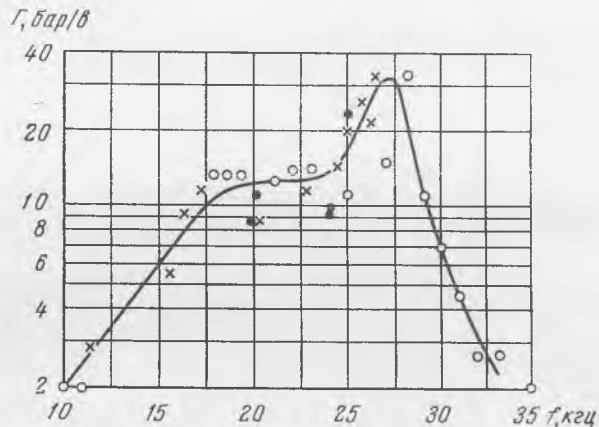


Рис. 29. Частотная характеристика чувствительности резонансного приемника ультразвука с «мозаикой»

На рис. 26 приведены характеристики направленности одного из таких приемников звука с резонансной частотой 25 кГц, а на рис. 27 — частотная характеристика чувствительности приемника с резонансной частотой 24 кГц с продольной поляризацией пьезоэлемента.

Пьезоэлектрические приемники ультразвука описанного типа обладают сравнительно малой направленностью вследствие малого диаметра приемной диафрагмы. Простое увеличение диаметра диафрагмы при одном пьезоэлементе приводит к сужению главного лепестка характеристики, но может вызвать и возрастание вторичных лепестков. Поэтому были созданы приемники ультразвука, в которых использована своего рода «мозаика» из нескольких пьезоцилиндров при большом диаметре диафрагмы. Пример такой конструкции приведен на рис. 28. На плоскую диафрагму из стали наклеены торцами цилиндрические пьезоэлементы, тщательно подобранные по резонансным частотам. Цилиндры приклеивались с помощью карбинольного клея. Задние концы цилиндров оставались свободными. Диафрагма монтировалась в кожухе приемника ультразвука с помощью резинового уплотняющего кольца.

На рис. 29 показана частотная характеристика в режиме излучения такого преобразователя с диаметром диафрагмы 32 см и резонансной частотой 27 кГц.

### § 3. Волноводные щупы

Для интенсификации некоторых технологических процессов используется явление кавитации, развивающееся в поле интенсивных ультразвуковых волн. Однако измерение звукового давления в режиме кавитации сопряжено с известными трудностями. Кавитация, как правило, быстро разрушает пьезоэлемент приемника ультразвука, помещаемый в ультразвуковое поле. Чтобы защитить приемный элемент от разрушающего действия кавитации стали применять волноводные щупы, у которых в



поле помещается не чувствительный элемент, а волновод в виде металлического стержня [9—11]. Чувствительный элемент в этом случае (пьезо-керамика или катушка магнитострикционного датчика) помещается на другом конце волновода. В частности, Майер [9] для измерения кавитационного шума в широкой полосе частот использовал магнитострикционный датчик (никелевый стержень диаметром 0,5 мм с поглотителем на

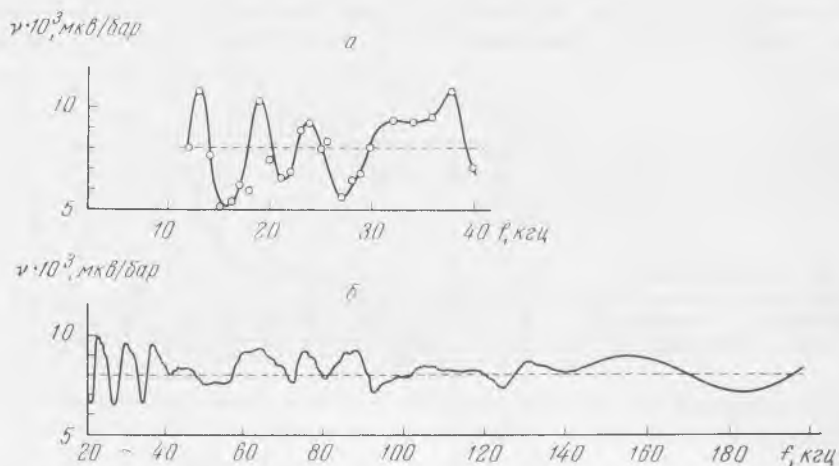


Рис. 30. Частотная характеристика чувствительности щупа  
а — в диапазоне частот 10—40 кГц; б — в диапазоне частот 20—200 кГц

конце), который при измерениях подвешивался вертикально над измерительной ванной. Длина стержня выбиралась равной 2,5 м. При этом затухание волны нижней рабочей частоты (14,6 кГц) было достаточным, чтобы отраженная от конца стержня волна не влияла на измерения. Однако

такой щуп неудобен в обращении вследствие больших размеров волновода. Более удобный волноводный щуп был разработан [11] с использованием пьезоэлектрического метода преобразования упругих колебаний в электрические. Щуп позволял проводить измерения звукового давления в режиме кавитации в диапазоне частот 15—1500 кГц.

Характеристика чувствительности щупа в диапазонах частот 10—40 кГц и 20—200 кГц показаны на рис. 30. Чувствительности на частотах 500, 1000 и 1500 кГц равны соответственно  $1,6 \cdot 10^{-2}$ ,  $1,8 \cdot 10^{-2}$  и  $2,0 \cdot 10^{-2}$  мкВ/бар.

Характеристика направленности щупа на частоте 1 МГц приведена на рис. 31, а конструкция описываемого волноводного щупа — на рис. 32. Волноводом 4 служит центральная жила кабеля РК-19. Чувствительный элемент 2 в виде цилиндра из керамики титаната бария укрепляется на волноводе на некотором расстоянии от приемного конца волновода. Внутренняя и наружная поверхности цилиндра посеребрены. Внутренний слой серебра находится в электрическом контакте с волноводом, а к наружному слою серебра припаяна центральная жила второго кабеля РК-19 9, назначение которого — передавать электрический сигнал на вход усилительной аппаратуры. Волновод находится под нулевым потенциалом. Кабель РК-19 8, центральная жила которого служит волново-

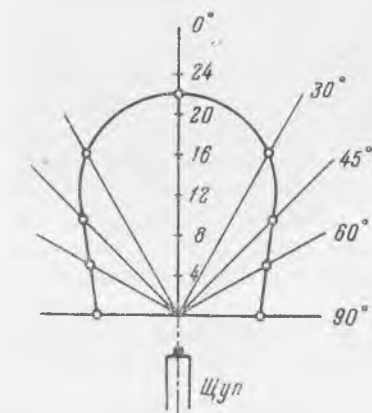


Рис. 31. Характеристика направленности щупа на частоте 1 МГц

дом, играет роль акустической линии, в которой поглощаются ультразвуковые волны, распространяющиеся по волноводу. Поглотителем служит полиэтиленовая оболочка кабеля 5. Длина акустической линии 1,5 м.

Волновод с пьезоэлементом помещены в арматуру, состоящую из корпуса 3, акустического герметизированного экрана 1 и сальникового устройства 6, 7.

Цилиндрический пьезоэлемент из керамики титаната бария с внутренним и наружным диаметрами соответственно 0,6 и 1,4 мм и высотой 2 мм вырезан на ультразвуковом станке 4770 из целой пластины; емкость такого пьезоэлемента около 180—200 пф.

Кабель РК-19, центральная жила которого служит волноводом, выбран потому, что он имеет самую тонкую центральную жилу (0,56 мм),

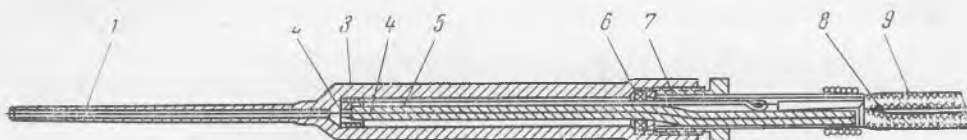


Рис. 32. Схема волноводного щупа

в результате чего диаметр приемного конца волновода остается меньше длины ультразвуковой волны во всем рабочем диапазоне частот. Если условие малости приемного элемента щупа по сравнению с длиной волны не существенно, то может быть использован любой другой кабель. В частности, были изготовлены и хорошо работали щупы с кабелем РК-1, у которого диаметр центральной жилы 0,72 мм. Возможно также использование кабеля типа РД при изготовлении волноводного щупа [21]. В этом случае одна из двух жил кабеля используется в качестве волновода, а другая служит для снятия потенциала с пьезоэлемента.

Принцип действия волноводных щупов основан на следующем явлении. Когда вдоль волновода распространяется ультразвуковая волна, длина которой больше диаметра волновода, эффект Пуассона приводит к периодическим увеличениям и уменьшениям диаметра волновода, совершающимся в фазе со сжатиями и растяжениями в ультразвуковой волне. Эти увеличения и уменьшения диаметра волновода воздействуют на пьезоэлемент, создавая в нем радиальные механические напряжения, которые и регистрируются.

#### § 4. Приемники с механической трансформацией ультразвукового давления

При работе приемников ультразвука в интенсивных ультразвуковых полях, требование высокой чувствительности приемников, как правило, не является существенным. Иногда с успехом могут применяться приемники, чувствительность которых измеряется сотыми и даже тысячными долями  $мкв/бар$ . Однако могут быть случаи, когда приемник ультразвука, предназначенный для работы в интенсивном ультразвуковом поле, должен иметь чувствительность, измеряемую сотнями и даже тысячами  $мкв/бар$ . Необходимость в таких приемниках может возникнуть, например, при приеме переменной составляющей радиационного давления (см. гл. 2, § 2), которая составляет всего несколько десятков бар в ультразвуковом поле интенсивностью порядка  $1 вт/см^2$ . Для такого рода измерений в основном и предназначены приемники с механической трансформацией ультразвукового давления, к описанию которых мы переходим.

Сущность механической трансформации звукового давления может быть пояснена на следующем простейшем примере. Пусть ультразвуковое давление  $p$  принимается некоторой пластинкой с поверхностью  $S$ . Сила, с которой плоская ультразвуковая волна действует на поверхность  $S$  при нормальном падении на нее, равна произведению  $pS$ . Если пластинка  $S$  опирается на миниатюрный чувствительный элемент с поперечным сечением  $s$ , то вся сила  $pS$  распределится по поверхности  $s$  и давление на чувствительном элементе будет во столько раз больше звукового давления, во сколько раз поверхность  $S$  больше поверхности  $s$ .

В описанных ранее сферических и цилиндрических приемниках ультразвука также использован принцип механической трансформации давления [17]. Однако там коэффициент трансформации не превышает десятков, в лучшем случае сотен. В работах [22, 23] описаны конструкции приемников ультразвука, коэффициент трансформации которых может

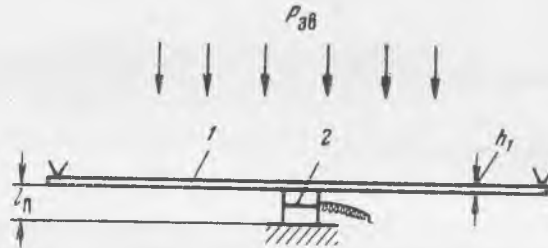


Рис. 33. Схема, поясняющая принцип действия приемника ультразвука с механической трансформацией ультразвукового давления (первый вариант)

достигать нескольких тысяч. Эти приемники широкополосны в диапазоне частот от единиц  $гц$  до десятков  $кгц$  и их чувствительность составляет десятки и даже сотни  $мкв/бар$ . Отдельные экземпляры приемников, предназначенные для работы в диапазоне низких звуковых частот, имеют чувствительность около  $10\,000$   $мкв/бар$ .

Здесь описаны два варианта приемников с механической трансформацией давления. Принцип действия первого (простейшего) варианта показан на рис. 33. Ультразвуковое давление принимается пластинкой 1, опертой (или защемленной) по краю, и трансформируется в давление на пьезоэлемент 2, подпирающий пластинку в центре.

В случае опертой приемной пластинки коэффициент трансформации определяется соотношением

$$K = \frac{0,59 r^4 E_2 (5 + \nu) (1 - \nu)}{\pi l_{\pi} E_1 h_1^3 + 0,75 S_2 r^2 (3 + \nu) (1 - \nu)} \quad (\text{при } h_1 \ll r). \quad (1)$$

Здесь  $r$ ,  $h_1$ ,  $E_1$  и  $\nu$  — радиус, толщина, модуль Юнга и коэффициент Пуассона приемной пластинки;  $l_{\pi}$ ,  $S_2$  и  $E_2$  — толщина, площадь сечения и модуль Юнга материала пьезоэлемента.

Частота первого резонанса такой системы в случае опертой пластинки с достаточной точностью определяется по формуле

$$f = \frac{\alpha^2}{2\pi r^2} \sqrt{\frac{gD}{\rho h_1}}, \quad (2)$$

где  $\alpha = 3,85$ ;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $\rho$  — плотность материала пластинки;  $D = \frac{E_1 h_1^3}{12(1 - \nu^2)}$  — цилиндрическая жесткость пластинки.

В случае заземленной пластинки первый резонанс будет несколько выше.

Конструкция пьезоэлемента показана на рис. 34. В качестве материала пьезоэлемента выбран сульфат лития, обладающий высоким значением пьезоконстанты давления. Пьезоэлемент состоит из двух квадратных пластинок сульфата лития размером  $0,5 \text{ см} \times 0,5 \text{ см} \times 0,13 \text{ см}$ , склеенных так, что векторы поляризации направлены навстречу друг другу. Electroдами пьезоэлемента служат стальные пластинки 1, 2 и 3 толщиной  $0,08 \text{ мм}$ , приклеенные к пьезоэлементу. Электрод 2 — общий, электроды 1 и 3 электрически закорочены. Таким образом, обе пластинки пьезоэлемента работают параллельно. Пьезоэлемент центральным электродом присоединяется по входу катодного повторителя, вмонтированного в корпус приемника.

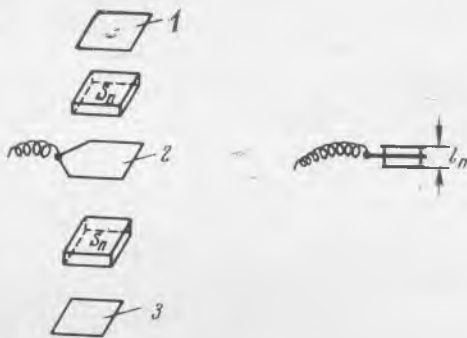


Рис. 34. Устройство пьезоэлемента

Конструктивно приемник выполнен в виде корпуса 1 (рис. 35) с выфрезерованным углублением для монтажа катодного повторителя, приемной пластинки 2 и прижимного кольца 3. Приемная пластинка может быть выполнена заодно с кольцом в виде навинчивающейся крышки. В этом случае пластинка работает как заземленная. Пьезоэлемент 4 слегка зажимается с помощью кольца 3 между корпусом 1 и приемной пластинкой 2. Питание катодного повторителя осуществляется с помощью

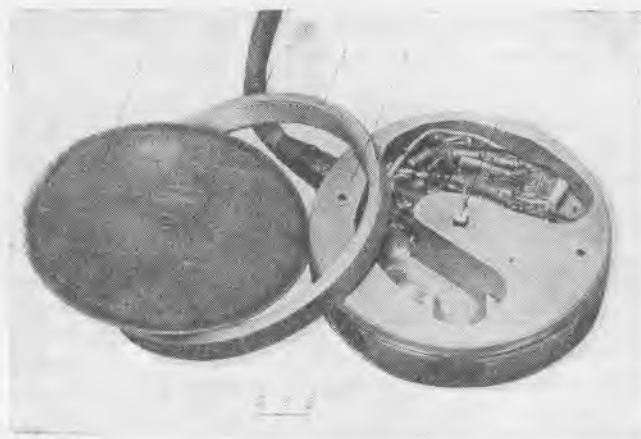


Рис. 35. Приемник ультразвука с механической трансформацией ультразвукового давления (первый вариант)

кабеля 5 от постороннего источника (на рисунке не показан). По этому же кабелю электрический сигнал с выхода катодного повторителя подается к регистрирующей аппаратуре.

На рис. 36 приведена схема катодного повторителя, специально предназначенная для работы от пьезоэлемента [24]. Катодный повторитель надежно работает при анодном напряжении  $10\text{--}15 \text{ в}$  и имеет коэффициент передачи  $k = 0,82$ .

Чувствительность приемника описанной конструкции с достаточной точностью может быть рассчитана по формуле

$$\frac{U}{P} = \frac{4\pi d}{\varepsilon} k \frac{l_{\text{п}}}{2} C_{\text{п}} K \frac{\omega R \cdot 300 \cdot 10^6}{\sqrt{\omega^2 R^2 (C_{\text{вх}} + C_{\text{п}})^2 + 1}} \text{ мкв/бар.} \quad (3)$$

Здесь  $d$ ,  $\varepsilon$  и  $C_{\text{п}}$  — пьезомодуль, диэлектрическая проницаемость и емкость пьезоэлемента;  $R$  — утечка сетки катодного повторителя;  $C_{\text{вх}}$  — входная емкость катодного повторителя;  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  — частота).

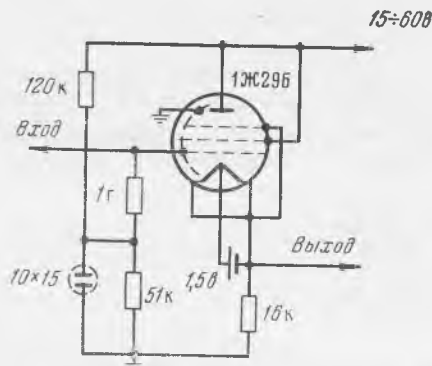


Рис. 36. Принципиальная схема катодного повторителя

Принцип действия второго варианта приемника показан на рис. 37.

Ультразвуковое давление принимается оперткой (или заземленной) по краю пластинкой 1 и трансформируется в давление на переходный выступ 2 стального прямоугольного бруска 3 с выфрезерованными углублениями 4 и 5. Брусок 3 концами оперт на корпус приемника. В углубление 4 вкладываются две пьезоэлектрические пластинки так, как показано на рисунке. Векторы поляризации (схематически показаны стрелками) направлены навстречу друг

другу. В этом случае пьезоэлементы, как и в первом варианте, работают параллельно. Вывод от общего электрода присоединяется ко входу катодного повторителя.

В углубление 5 вкладывается стальная пластинка, слегка изогнутая по дуге, и нажатием сверху впрессовывается в углубление. Выпрямляясь, пластинка удлиняется и через переходный выступ запрессовывает пьезоэлементы. Запрессовка пьезоэлементов необходима для того, чтобы обеспечить хороший механический контакт с бруском.

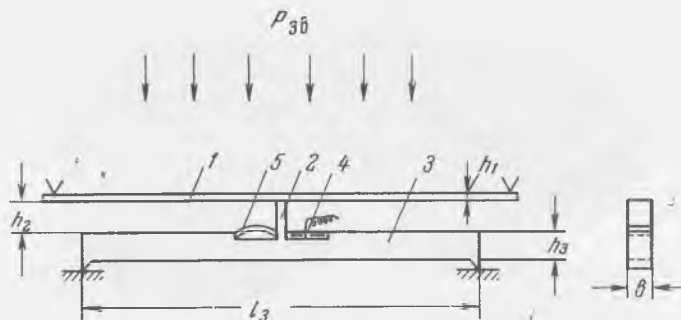


Рис. 37. Схема, поясняющая принцип действия приемника ультразвука с механической трансформацией ультразвукового давления (второй вариант)

Давление, трансформированное с приемной пластинки 1 на переходный выступ 2, прогибает брусок 3. В результате появляются внутренние напряжения в бруске, максимальные вблизи места, где впрессованы пьезоэлементы [25], и существенно превышающие вызвавшее их давление со стороны выступа 2. Так осуществляется вторая трансформация давления. Первой мы называем трансформацию давления с приемной пластинки 1 на выступ 2. Общий коэффициент трансформации равен произведению первого и второго коэффициентов и может достигать величины в несколько тысяч.

Формула для расчета общего коэффициента трансформации в случае опертой пластинки имеет вид

$$K = \frac{9r^4 l_3 (5 + \nu) (1 - \nu)}{32E_1 b h_1^3 h_3^2 \left[ \frac{l_2}{S_2 E_2} + \frac{3r^2 (3 + \nu) (1 - \nu)}{4\pi E_1 h_1^3} + \frac{l_3^3}{4E_3 b h_3^3} \right]} \quad (\text{при } h_1 \ll r). \quad (4)$$

Здесь по-прежнему  $r, h_1, E_1$  и  $\nu$  — параметры приемной пластинки;  $l_2, E_2, S_2$  — высота, модуль Юнга и площадь поперечного сечения переходного выступа;  $l_3, h_3, b$  и  $E_3$  — длина, высота, ширина и модуль Юнга материала бруска.

Первая резонансная частота системы в случае опертой по краю приемной пластинки с достаточной точностью может быть определена по той же



Рис. 38. Общий вид бруска

формуле (2) при  $\alpha = 2,22$ . Однако при этом необходимо учитывать, что положение первого резонанса самого бруска определяется формулой

$$f = \frac{\alpha^2}{2\pi l_3^2} \sqrt{\frac{g E_3 I}{\rho b h_3}}, \quad (5)$$

где

$$I = \frac{b h_3^3}{12}, \quad \text{а } \alpha = \frac{\pi}{2}.$$

Чувствительность приемника рассчитывается по формуле (3).

Конструкция приемника такая же, как и в первом варианте. Разница лишь в том, что вместо пьезоэлемента (рис. 35), между приемной пластинкой и корпусом зажимается брусок. На рис. 38 показан брусок, применявшийся в одном из приемников.

Соотношения, аналогичные (1), (2) и (4), легко могут быть рассчитаны и для случая заземленной по контуру приемной пластинки.

Приемники ультразвука описанной конструкции предназначены для работы как в воздухе, так и в воде; в последнем случае необходимо лишь герметизировать их. Может быть предложен следующий простейший способ герметизации.

Резьба может быть герметизирована замазкой, состоящей из смеси воска и канифоли в произвольной пропорции (лучше 1 : 1), наносимой перед завинчиванием. При этом корпус и прижимное кольцо (или крышку) рекомендуется прогреть до 60—70°. На наружную поверхность приемной пластинки и кольца следует наклеить тонкую резину, чтобы она закрыла доступ воде в возможный зазор между пластинкой и кольцом. Резина толщиной 0,5 мм изменяет параметры приемника несущественно.

При расчете резонансной частоты приемника, предназначенного для работы в воде, необходимо учитывать присоединенную массу воды. При работе в звуковом диапазоне частот приемники могут быть использованы в комплекте с репортерскими магнитофонами. Такой комплект весьма портативен и позволяет записывать звуки как в воздухе, так и в воде.



Рис. 39. Комплект

В этом случае приемник подключается непосредственно на вход магнитофона. Малогабаритный источник питания приемника звука монтируется в магнитофоне. В схему магнитофона вносятся несложные изменения, основное из которых — удаление входного трансформатора и подключение выхода приемника непосредственно к первому усилительному каскаду схемы. В случае использования «Репортера-3» требуется еще один согласующий каскад на входе схемы магнитофона (эмиттерный повторитель).

На рис. 39 показана фотография такого комплекта.

## § 5. Радиометры

При изучении некоторых вопросов, связанных с особенностями распространения или физико-химического воздействия интенсивных ультразвуковых волн оказывается возможным и полезным в качестве индикатора

ультразвуковой энергии использовать радиометр. Радиометром издавна пользуются для измерения интенсивности ультразвуковых колебаний [3, 26]. Существует множество конструкций радиометра, нашедших применение в тех или иных исследованиях [3, 4, 15, 26, 29]. В последнее время интерес к радиометрическим измерениям существенно повысился в связи с необходимостью количественной оценки энергетического баланса в ультразвуковом поле при наличии кавитации [5, 6].

Прежде чем рассматривать конструкцию радиометров, мы напомним некоторые сведения из теории радиационного давления в поле интенсивных ультразвуковых волн.

Известно [41, 42], что радиационное давление звукового луча на плоскую границу раздела двух сред может быть записано в виде

$$\overline{p} = \overline{E} (1 + R) \cos^2 \beta; \quad (6)$$

здесь  $R$  — коэффициент отражения звука на границе раздела сред;  $\beta$  — угол падения звука на границу раздела сред;  $\overline{E}$  — среднее по времени значение плотности полной энергии плоской звуковой волны.

В случае плоской звуковой волны синусоидальной формы, падающей на отражающую плоскую границу раздела сред под прямым углом, соотношение (6) имеет хорошо знакомый вид:

$$\overline{p} = 2 \frac{\overline{I}}{c}. \quad (7)$$

Здесь  $\overline{I} = \frac{\overline{p^2}}{2\rho c}$  — среднее по времени значение интенсивности волны;  $c$  — скорость звука в среде;  $p$  — амплитуда давления в волне.

Однако интенсивная ультразвуковая волна не всегда имеет синусоидальную форму. Обычно это бывает лишь в непосредственной близости к излучателю, а на некотором расстоянии от него интенсивная ультразвуковая волна, как правило, искажается и может принимать даже пилообразную форму (см. гл. 2, § 1).

В этом случае соотношение между радиационным давлением и интенсивностью волны имеет вид, несколько отличный от (7) [15].

Действительно, учитывая, что

$$\bar{E} = \overline{\rho v^2} \quad (8)$$

и что в искаженной волне справедлива формула Фэя [25]

$$v = \frac{2b\omega}{(\gamma+1)\rho c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n(\omega t - ka)}{\operatorname{sh} n(\alpha_0 - \alpha a)}, \quad (9)$$

можно записать

$$\overline{\mathcal{P}} = \sum_{n=1}^{\infty} B \frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 n\omega t dt, \quad (10)$$

где  $B = \frac{8b_1^2\omega^2}{\rho c^2(\gamma+1)^2 \operatorname{sh}^2 n\alpha_0}$ ;  $T$  — период ультразвуковой волны;

$$b_1 = \frac{4}{3} \eta + \xi + \mu \left( \frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p} \right);$$

$\eta$  и  $\xi$  — первая и вторая вязкость;  $\mu$  — коэффициент теплопроводности,  $C_v$  и  $C_p$  — теплоемкость при постоянном объеме и давлении;  $n$  — номер гармонической составляющей искаженной волны;  $\gamma$  — параметр, характеризующий нелинейность среды  $\alpha_0 = \frac{\pi b_1 \omega}{(\gamma+1)p}$ ;  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  — частота).

После выполнения интегрирования соотношение (10) принимает вид

$$\overline{\mathcal{P}} = 2 \frac{p^2}{3\rho c^2}. \quad (11)$$

Примечательно, что соотношение (11) отличается от соотношения (7) лишь тем, что в знаменателе вместо 2 стоит 3, т. е. радиационное давление пилообразной волны, имеющей амплитуду  $p$  (на плоское отражающее препятствие), в 1,5 раза меньше радиационного давления синусоидальной волны с такой же амплитудой (на то же препятствие).

В случае сферического препятствия сила радиации, действующая на препятствие и обусловленная синусоидальной и пилообразной волной, соответственно имеет вид

$$F = \pi r^2 \frac{p^2}{2\rho c^2} \quad (12)$$

и

$$F = \pi r^2 \frac{p^2}{3\rho c^2} \quad (13)$$

(здесь  $r$  — радиус сферы).

Соотношения (7), (11), (12) и (13) могут быть использованы для вычисления интенсивности синусоидальных и пилообразных ультразвуковых волн по измеренным значениям сил радиации, действующих на радиометр, помещенный в ультразвуковое поле, если выполняется условие

$$kr \gg 1, \quad (14)$$

т. е. если размеры радиометра много больше длины волны и он принимает плоскую волну.

Здесь  $k = 2\pi/\lambda$  ( $\lambda$  — длина волны);  $r$  — радиус диска или сферы радиометра.

Если фронт волны сферический, а радиометр плоский, то в показания радиометра следует вводить поправку.

Рассмотрим два типичных примера применения радиометра.



1. Измерения проводятся в непосредственной близости от излучателя. При этом реактивная составляющая сопротивления излучения еще имеет заметную величину и может существенно повлиять на результаты измерения. Расчет поправки очень сложен, поэтому в таких случаях радиометром лучше не пользоваться.

2. Измерения проводятся вдали от излучателя (расстояние от излучателя много больше длины волны), но фронт волны сферический.

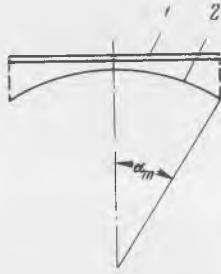


Рис. 40. Схема измерения с помощью плоского радиометра в поле сферически расходящейся волны

Это иллюстрируется рис. 40, где сферическая волна 2 падает на плоский радиометр 1. В таком случае при измерении радиационного давления в формулу (7) следует вводить поправочный множитель, равный  $\cos^2 \alpha_m/2$ . При удалении от излучателя фронт волны становится все более плоским и множитель  $\cos^2 \frac{\alpha_m}{2} \rightarrow 1$ .

При  $kr \sim 1$  в формулах (7), (11) — (13) появляется множитель  $f(kr)$ , учитывающий дифракцию волны на радиометре, размеры которого сравнимы с длиной волны.

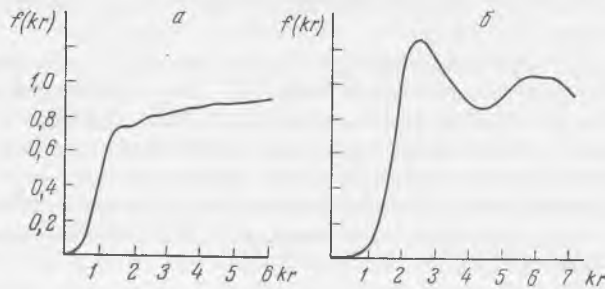


Рис. 41. Вид функции  $f(kr)$

a — для плоского радиометра; б — для сферического радиометра

Аналитическое выражение для  $f(kr)$  очень громоздко и здесь не приводится. На рис. 41 значения  $f(kr)$  представлены графически для плоского и сферического радиометров [4], помещенных в поле плоских синусоидальных волн. Для случая пилообразных волн аналогичные множители могут быть рассчитаны без большого труда.

Иногда радиометр может быть использован для решения тех же задач, которые решает, например, пьезоэлектрический приемник ультразвука, с той лишь разницей, что радиометр не может регистрировать форму волны. Например, с помощью миниатюрного сферического радиометра может быть детально исследовано поле концентратора ультразвука в области фокуса.

Обычно радиометр выполняется либо в виде различного рода весов [3, 26—28], либо в виде плоского диска или сферы на упругой ножке, работающей на изгиб [15, 29].

Чрезвычайно оригинальная конструкция радиометра описана в работе [27], и на ней стоит остановиться подробнее. Радиометр обладает высокой чувствительностью и дает возможность измерять силу радиации в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^3$  *дин*. Другим ценным качеством прибора является то, что чувствительный элемент (сфера) все время находится в одной и той же точке поля, в то время как в других типах радиометров чувствительный элемент отклоняется от первоначального положения.

Устройство радиометра показано на рис. 42. Подвижная часть радиометра состоит из легкой прочной фермы 1, укрепленной на ленточных металлических растяжках на поворотной головке (корректоре) в стойке 2 и пружине в основании 3 прибора. На одном конце фермы подвешен на металлической ленте приемник радиационного давления — шар 4, а на другом укреплена прямоугольная рамка 5 из медной изолированной проволоки, взаимодействующая с полем постоянного магнита 6. Растяжки создают слабый противодействующий момент, устанавливаемый в соответствии с допустимым временем успокоения прибора, и используются для подвода тока к рамке, так как они изолированы друг от друга. В середине фермы укреплено зеркало 7.

Звуковая волна, действующая с силой  $F$  на приемник 4 в направлении, перпендикулярном плоскости фермы, поворачивает подвижную часть радиометра. Взаимодействие между полем магнита и током  $I$  соответствующего направления и величины, пропускаемым через рамку 5, создает момент, возвращающий подвижную часть в исходное положение, т. е. компенсирующий момент силы  $F$ . Нормальное (нулевое) положение подвижной части точно восстанавливается при помощи светового указателя, отраженного на удаленную шкалу от зеркала 7.

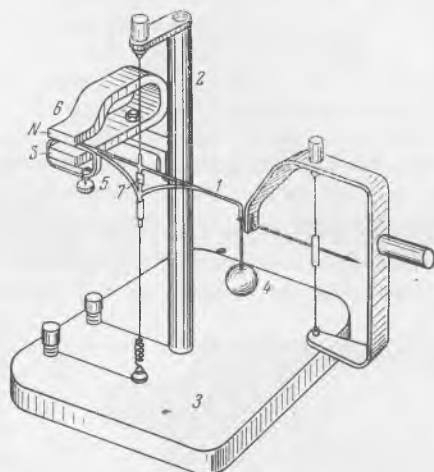


Рис. 42. Конструкция радиометра

Так как при заданном магните величина указанного взаимодействия определяется силой тока  $I$ , то градуировка прибора сводится к определению соотношения между  $I$  и  $F$ . Для этой цели служит динамометр, изображенный на том же рисунке справа.

Описанный радиометр отличается известной сложностью конструкции. Поэтому в тех случаях, когда не требуется высокая точность измерений и нет необходимости в широком диапазоне измеряемых давлений, могут быть использованы более простые конструкции. В наших исследованиях нашли применение миниатюрный сферический радиометр [15] и плоский радиометр [29]. Миниатюрный сферический радиометр имел диаметр сферы 0,9 мм и чувствительность 0,009 *вт/см<sup>2</sup>* на одно деление микроскопа. Когда необходимо было измерять среднюю по сечению ультразвукового пучка интенсивность волн, использовался сферический радиометр с диаметром сферы 6,3 мм (чувствительность 0,015 *вт/см<sup>2</sup>* на одно деление микроскопа) и плоский радиометр с диаметром диска 1,5 см [29] (чувствительность 0,011 *вт/см<sup>2</sup>* на одно деление микроскопа).

Конструкция сферического радиометра показана на рис. 43, а, а общий вид — на рис. 43, б. Чувствительным элементом радиометра является сфера 1 из стекла, выполненная как одно целое с тонкой стеклянной ножкой 2 длиной 40—50 мм и диаметром 0,06—0,12 мм. В зависимости от размеров сферы она может быть полой (заполненной воздухом) или сплошной. Сфера с ножкой образована из капилляра 3 с внешним диаметром

2,5 мм. Капилляр 3 вклеивается с помощью воска или клея БФ-2 в отверстие держателя из плексигласа 4. Шарик с ножкой обрамляется рамкой из плексигласа 5 толщиной 1 мм и шириной 10 мм. Боковые отверстия

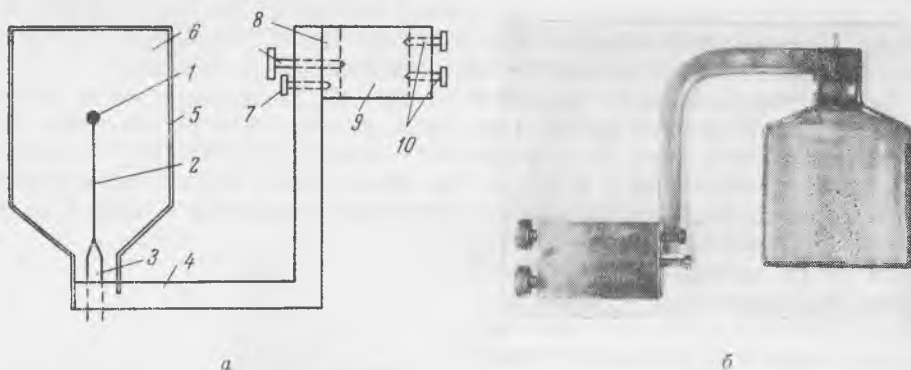


Рис. 43. Схема сферического радиометра

обрамления заклеиваются тонкой (около 10 мк) тефлоновой пленкой 6, а внутренняя полость обрамления заполняется дистиллированной водой. Держатель из плексигласа 4 с помощью винта 7 прикрепляется к направляющей муфте 8, имеющей овальное отверстие 9 и три установочных винта 10.

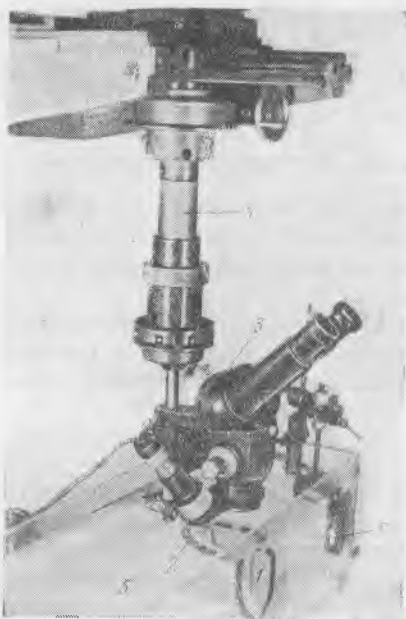


Рис. 44. Общий вид установки

1 — радиометр; 2 — стержень; 3 — микроскоп; 4 — координатное устройство; 5 — ванна с водой; 6 — излучатель ультразвуковых колебаний

С помощью муфты и установочных винтов радиометр укрепляется на стержне, который, в свою очередь, зажимается в координатном устройстве. На этом же стержне закрепляется микроскоп типа МБС-1 таким образом, что через плексигласовое обрамление радиометра в микроскоп видна сфера радиометра. В таком виде вся система показана на рис. 44.

Радиометр работает следующим образом. С помощью координатного устройства радиометр устанавливается в поле излучателя. Если ультразвук попадает на радиометр, последний отклоняется от положения равновесия под действием сил радиации, что легко может быть отмечено по микрометрической шкале микроскопа. Для удобства наблюдения за сферой одна ее половина окрашена черной нитрокраской, а другая — белой (граница раздела черной и белой половин служит идеальной риской, по которой ведется отсчет на шкале микроскопа).

При градуировке радиометра сила, необходимая, чтобы отклонить сферу на одно деление по шкале микроскопа, определялась непосредственным нагружением сферы разновесами (при горизонтальном положении радиометра до заполнения внутренней полости обрамления дистиллированной водой) и наблюдением соответствующего отклонения сферы в микроскоп. Затем по формуле (12) или (13) вычислялась интенсивность ультразвуко-

вых волн синусоидальной или пилообразной формы, необходимая, чтобы соответствующая ей сила радиации отклонила сферу радиометра тоже на одно деление шкалы микроскопа. Это значение интенсивности численно равняется чувствительности радиометра (в  $\text{вт/см}^2 \cdot 1$  дел. шкалы).

Чувствительность радиометра с диаметром сферы 6,3 мм определялась также на частоте 1,16 Мгц путем сравнения с чувствительностью миниатюрного пьезоэлектрического приемника, градуированного в диапазоне частот 0,5—1,16 Мгц методом взаимности, при этом результаты градуировок совпадали в пределах 10%.

Радиометр с диаметром сферы 0,9 мм градуировался путем сравнения с градуированным радиометром и пьезоэлектрическими приемниками.

Конструкция плоского радиометра показана на рис. 45. Радиометр представляет собой полый диск 1, закрепленный на плоской пружинящей стойке из фосфористой бронзы 2. Сверху расположен микроскоп 4 со шкалой, позволяющей наблюдать по смещению пластинки 3 с рисками отклонение диска под действием радиационного давления. Полый диск радиометра и объектив микроскопа находятся в резервуаре 5, заполненном трансформаторным маслом, акустическое сопротивление которого

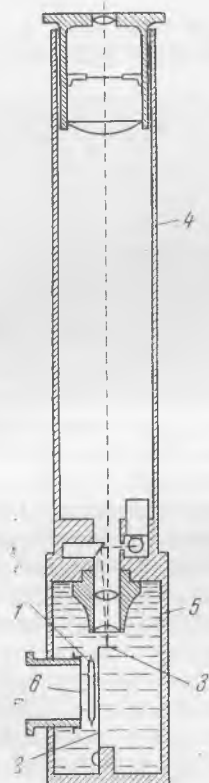


Рис. 45. Конструкция плоского радиометра

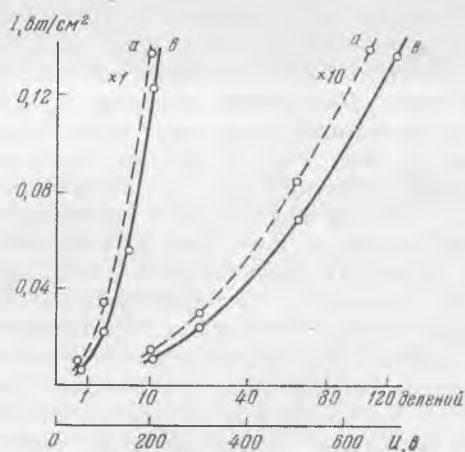


Рис. 46. Градуировочные кривые

мало отличается от акустического сопротивления воды; масло отделено звукопроницаемой пленкой 6 от внешней среды.

Градуировка радиометра производилась так же, как и в предыдущем случае, путем нагружения диска разновесами. Кроме того, для проверки точности градуировки этим же радиометром были проведены измерения интенсивности ультразвука на частоте 2 Мгц при различных значениях напряжения на кварцевом излучателе. Полученные результаты приведены на рис. 46 (кривая в), где для сравнения построена и теоретическая кривая (кривая а), подсчитанная по известной формуле

$$I = 0,85 (fU)^2, \quad (15)$$

где  $I$  — интенсивность ультразвуковых волн (в  $\text{вт/см}^2$ );  $f$  — частота (в Мгц);  $U$  — напряжение на кварце (в кВ). По оси абсцисс

отложены деления шкалы радиометра и напряжение на кварце в вольтах. Видно достаточно хорошее совпадение обеих кривых.

Не следует забывать, что формула, по которой построена теоретическая кривая, выведена без учета потерь в кварце и в системе его крепления и годится лишь в том случае, если кварц работает в режиме одностороннего излучения.

## Глава 2

### ГРАДУИРОВКА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРИЕМНИКОВ

Одной из основных характеристик приемника ультразвука является его чувствительность. В дальнейшем нас будет интересовать главным образом так называемая чувствительность по полю, определяемая как отношение э. д. с., развиваемой приемником ультразвука, помещенным в некоторую точку ультразвукового поля, к тому ультразвуковому давлению, которое существовало бы в той же точке поля при отсутствии приемника.

Чувствительность приемника, вообще говоря, зависит от частоты, и поэтому приемник принято характеризовать частотной характеристикой его чувствительности. В измерительной практике не всегда бывает необходимо знать абсолютное значение чувствительности приемника ультразвука, а достаточно, например, иметь представление о ее частотной зависимости. В этом случае иногда оказывается возможным использовать чрезвычайно простой способ, который был, в частности, применен Ю. Я. Борисовым [11] для определения частотной характеристики чувствительности волноводных щупов. Сущность способа заключалась в том, что в волноводе щупа ультразвуковые волны различных частот возбуждались с помощью пластинки из керамического титаната бария, приклеенной к приемному торцу волновода. Пластика возбуждалась от генератора ЗГ-12, сигнал с приемного элемента щупа подавался на самописец Н-110, механически сцепленный с генератором: ротор переменного конденсатора генератора приводился во вращение от мотора самописца, что позволило снимать частотную характеристику в пределах 15—220 *кГц* с нанесением на характеристику меток частоты.

Для определения абсолютного значения чувствительности приемника ультразвука существует несколько методов.

Прежде всего следует упомянуть метод, основанный на теореме взаимности, и метод, основанный на использовании радиометра. Эти методы давно и хорошо известны [17, 26, 30]. Однако мы остановимся на методах, сравнительно недавно вошедших в метрологическую практику, но уже хорошо зарекомендовавших себя:

1) метод абсолютной и относительной градуировки, основанный на использовании явления искажения синусоидальной формы волны конечной амплитуды и превращении ее в пилообразную; этим методом могут быть градуированы только пьезоэлектрические приемники ультразвука в диапазоне частот от 0,4 до 30 *МГц*;

2) метод абсолютной и относительной градуировки по радиационному давлению; этот метод (и следующие за ним три метода), строго говоря, может быть использован лишь для градуировки пьезоэлектрических приемников ультразвука в диапазоне частот от нуля до резонансной частоты приемника;

- 3) метод абсолютной градуировки с помощью ударной волны;
- 4) метод абсолютной градуировки с использованием ступеньки давления;
- 5) гидростатический метод абсолютной градуировки;
- 6) метод топографической съемки; этот метод может быть применен лишь для градуировки пьезоэлектрических приемников ультразвука в диапазоне частот примерно от 0,5 до 10 Мгц.

### § 1. Использование явления искажения формы волны конечной амплитуды

Прежде чем изложить сущность метода, приведем некоторые сведения из нелинейной акустики, которые мы будем использовать в дальнейшем.

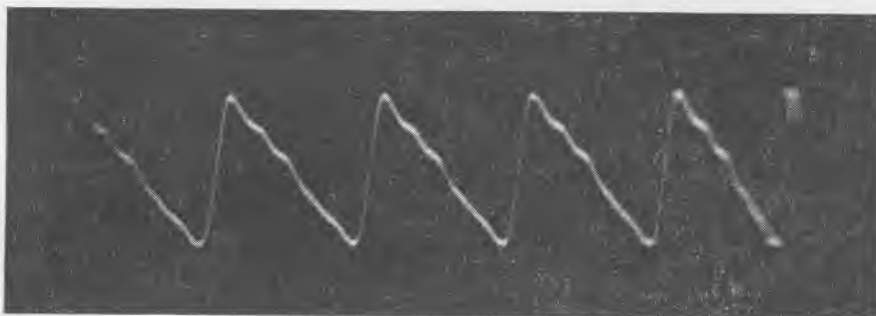


Рис. 47. Пилообразная ультразвуковая волна

При распространении волны конечной амплитуды в жидкости происходит искажение формы волны вследствие нелинейного характера уравнения состояния среды и уравнения движения [15, 31—34]. Характер искажений детально изучен для случая синусоидальных волн конечной амплитуды. Теоретически [31—33] и экспериментально [15, 34] установлено, что волна конечной амплитуды, имеющая у излучателя синусоидальную форму, становится пилообразной на некотором расстоянии от него. Это отчетливо иллюстрируется осциллограммой, приведенной на рис. 47. Расстояние от излучателя, на котором плоская волна конечной амплитуды и синусоидальной формы становится пилообразной, определяется соотношением

$$L = \frac{\lambda \rho c^2}{\pi (\gamma + 1) p} ; \quad (16)$$

здесь  $\lambda$  — длина волны;  $\rho$  — плотность жидкости;  $c$  — скорость звука;  $\gamma$  — параметр<sup>1</sup>, характеризующий нелинейные свойства среды и равный для воды примерно 6,5;  $p$  — амплитуда давления в волне.

Спектральный состав искаженной волны достаточно близок к спектральному составу идеальной пилообразной функции до номеров гармоник  $n$ , для которых выполняется неравенство

$$\left( \frac{\gamma + 1}{2} \frac{p}{b\omega} \right)^2 \gg n^2, \quad (17)$$

где

$$b = \frac{4}{3} \eta + \xi + \mu \left( \frac{1}{c_p} - \frac{1}{c_v} \right);$$

<sup>1</sup> Параметр  $\gamma$  характеризует соотношение нелинейного и линейного членов в уравнении состояния жидкости (более подробно об этом см. во второй книге настоящей монографии).

$\eta$  — первая вязкость;  $\xi$  — вторая вязкость;  $\mu$  — коэффициент теплопроводности;  $C_v$  и  $C_p$  — коэффициенты теплоемкости при постоянном объеме и давлении;  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  — частота).

Входящий в неравенство (17) параметр  $\rho/b\omega$  характеризует степень проявления нелинейных эффектов, называется числом Рейнольдса и обозначается символом  $Re$ . Если  $Re < 1$ , нелинейные эффекты практически не проявляются при распространении волны. Если  $Re > 1$ , нелинейные эффекты становятся заметными<sup>1</sup>.

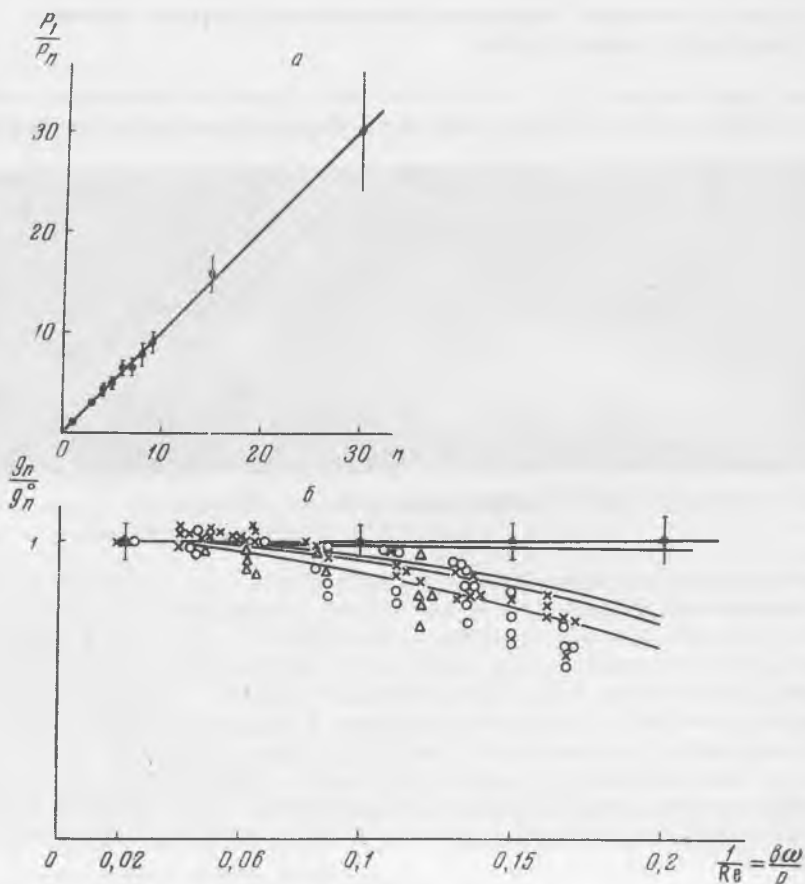


Рис. 48. Спектральный состав пилообразной волны в интервале значений  $n$

На рис. 48, а точками показан спектральный состав искаженной волны при  $Re = 47,5$ ,  $f = 466$  кГц. По оси абсцисс отложены номера гармонических составляющих волн  $n$ , а по оси ординат — отношение амплитуды  $p_1$  первой гармоники к амплитуде  $p_n$  гармоники с номером  $n$ . Сплошной линией показан спектральный состав пилообразной функции.

Легко проверить, что для всех номеров гармоник, отложенных по оси абсцисс на рис. 48, а, выполняется неравенство (17).

На рис. 48, б представлены результаты, иллюстрирующие тот случай, когда не выполняется неравенство (17). На этом графике по оси абсцисс

<sup>1</sup> Число Рейнольдса характеризует соотношение нелинейных членов и членов, учитывающих вязкость и теплопроводность среды, в уравнении Навье — Стокса (более подробно об этом см. во второй книге настоящей монографии).

отложена величина, обратная числу Рейнольдса, а по оси ординат — величина  $g_n/g_n^0$ , где  $g_n = p_1/p_n$  — отношение амплитуды первой гармоники к амплитуде гармоники номера  $n$  в ультразвуковой пилообразной волне,  $g_n^0 = (p_1/p_n)^0 = n$  — соответствующее отношение в пилообразной функции. Экспериментальные значения отмечены значками (кружки, крестики и т. п.), теоретические — сплошными линиями.

Для тех значений  $n$  и  $Re$ , для которых выполняется неравенство (17), отношение  $g_n/g_n^0 = 1$ . На графике кривая  $n = 6$  в пределах экспериментальной погрешности совпадает с линией  $g_n/g_n^0 = 1$  при всех значениях  $Re$ .

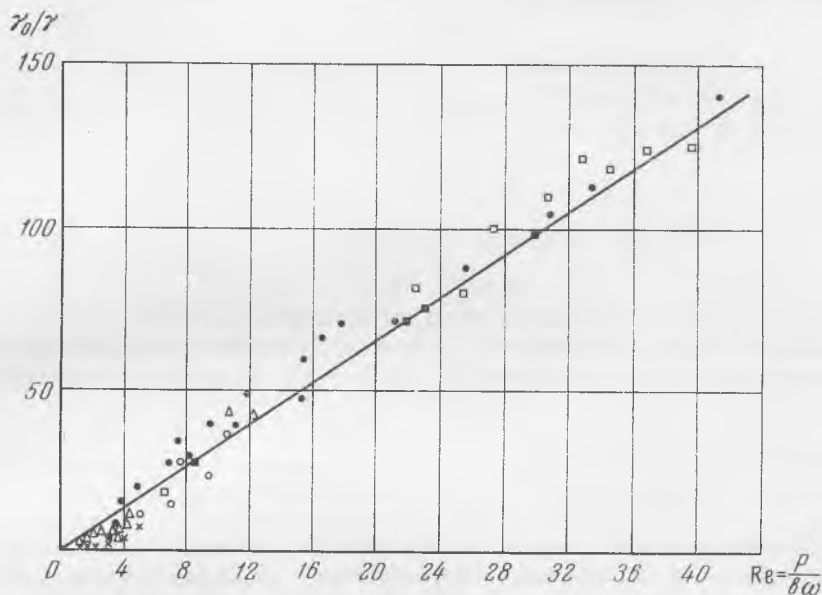


Рис. 49. Относительный коэффициент поглощения пилообразных волн в функции числа Рейнольдса

Действительно, даже при  $Re = 5$  (на графике  $1/Re = 0,2$ ) имеем  $(\frac{\gamma+1}{2} \frac{p}{b\omega})^2 \simeq 400$ , тогда как  $n^2 = 36$  и, следовательно, неравенство (17) выполняется. А вот для  $n = 30$  неравенство (17) уже не выполняется почти при всех значениях  $Re$ , отмеченных на графике. В соответствии с этим результаты эксперимента заметно отклоняются от линии  $g_n/g_n^0 = 1$ .

Пилообразные волны поглощаются на 1—2 порядка сильнее, чем волны малой амплитуды<sup>1</sup>.

На рис. 49 приведены сводные данные ряда авторов по поглощению пилообразных волн. По оси абсцисс отложено число Рейнольдса, а по оси ординат — отношение  $\alpha_{\pi}/\alpha$ , где  $\alpha_{\pi}$  — коэффициент поглощения пилообразных волн,  $\alpha$  — коэффициент поглощения волн малой амплитуды. Сплошной линией показана теоретическая зависимость

$$\frac{\alpha_{\pi}}{\alpha} = \frac{\gamma + 1}{\pi} \frac{p}{b\omega}. \quad (18)$$

Многочисленные экспериментальные исследования подтверждают, что коэффициент поглощения пилообразных волн не зависит от характера

<sup>1</sup> Механизм поглощения определяется процессами, протекающими в пределах фронта слабых ударных волн, которыми являются пилообразные волны (более подробно об этом см. во второй книге настоящей монографии).



расхождения волны, а зависит лишь от числа Рейнольдса, т. е. поглощение в конечном счете вызывается вязкостью и теплопроводностью среды.

В случае сферического расхождения волн изменение амплитуды пилообразной волны с расстоянием от излучателя определяется следующим соотношением:

$$p_x = \frac{p_0}{1 + \frac{x_0(\gamma + 1)p_0 f}{\rho c^3} \ln \frac{x_0}{x}} \quad (19)$$

здесь  $p_0$  и  $p_x$  — амплитуды пилообразной волны на расстояниях  $x_0$  и  $x$  от излучателя соответственно.

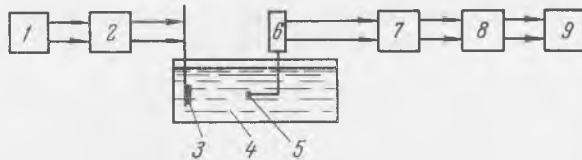


Рис. 50. Блок-схема установки

Это соотношение в пределах экспериментальной погрешности (10—15%) выполняется в реальной волне [15] и может быть использовано для градуировки приемников ультразвука [15, 35—37]. Представим соотношение (19) в виде

$$p_0 = \left( \frac{p_0 x_0}{p_x x} - 1 \right) \frac{\rho c^3}{(\gamma + 1) f x_0 \ln \frac{x}{x_0}} \quad (20)$$

Величины  $p_0$  и  $p_x$  в правой части этого выражения входят в виде отношения, которое легко может быть измерено экспериментально. Таким образом, измерив  $p_0/p_x$ ,  $x$  и  $x_0$ , легко вычислить значение  $p_0$ . Дальнейшая градуировка приемников ультразвука по известному  $p_0$  не представляет труда. Практически измерения выполняются на установке, блок-схема которой показана на рис. 50.

Излучателем служит резонансная пластинка из керамики титаната бария 3, питаемая от задающего генератора 1 через усилитель мощности 2. Ультразвуковые волны конечной амплитуды распространяются в ванне 4, заполненной водой, и принимаются миниатюрным ультразвуковым приемником 5. Электрический сигнал с приемника поступает через согласующий катодный повторитель 6, электронный гармонический анализатор 7 и широкополосный усилитель 8 на индикатор 9, которым, в частности, может служить электронный осциллограф.

Тот факт, что в установке используется плоский излучатель, не исключает возможности применения соотношения (20), справедливого для сферически расходящихся пилообразных волн. Плоский излучатель использован для того, чтобы нелинейные явления могли привести к искажению формы волны в ближней зоне излучателя, где распространяется плоская волна. Искаженная волна при дальнейшем распространении перейдет в дальнюю зону излучателя и будет расходиться по сферическому закону. Именно в дальней зоне поля, где справедливо соотношение (20), и проводятся все измерения.

Использовать сферический излучатель вместо плоского, чтобы с самого начала иметь сферически расходящуюся волну, не целесообразно, так как при таком расхождении получить пилообразную волну практически невозможно. Проводить измерения в ближней зоне излучателя нельзя вследствие сильных дифракционных искажений поля.

Измерения производятся в следующем порядке. С помощью приемника ультразвука и гармонического анализатора из пилообразной волны в зоне сферического расхождения на расстоянии  $x_0$  от излучателя выделяется одна из первых гармоник  $p_{n0}$ , и ее величина в относительных единицах отмечается на экране осциллографа. Затем эта же гармоника выделяется на расстоянии  $x$  от излучателя ( $p_{nx}$ ), и вновь отмечается ее величина. Отношение отмеченных величин будет равно  $p_0/p_x$  при условии линейности амплитудной характеристики приемной аппаратуры и пилообразной формы волны. Первое условие очевидно, а второе легко доказать. Действительно, для пилообразной функции справедливо соотношение

$$p = \frac{\pi}{2} n p_n. \quad (21)$$

Как отмечалось выше, при выполнении неравенства (17) это же соотношение справедливо и для ультразвуковой пилообразной волны. Но тогда можно записать:

$$p_0 = \frac{\pi}{2} n p_{n0} \quad (22)$$

и

$$p_x = \frac{\pi}{2} n p_{nx}; \quad (23)$$

разделив первое равенство на второе, получим

$$\frac{p_0}{p_x} = \frac{p_{n0}}{p_{nx}}. \quad (24)$$

Вычислив  $p_0$  с помощью соотношения (20) и используя соотношение (22), легко получить абсолютные значения амплитуд  $n$  гармонических составляющих, удовлетворяющих неравенству (17).

Если после этого с помощью градуируемого приемника ультразвука и анализатора выделить ряд гармоник и отметить их величины на экране осциллографа, а затем подать на вход усилительной аппаратуры калибровочные электрические сигналы частот, равных частотам соответствующих гармоник, то легко можно вычислить чувствительность приемника на частотах, соответствующих частотам гармоник волны. Относительная градуировка приемников (определение только частотной характеристики в относительных единицах) может быть проведена и без исследования характера спада амплитуды волны с расстоянием. Достаточно проанализировать спектральный состав ультразвуковой пилообразной волны, принятой градуируемым приемником, и сравнить полученный состав со спектром пилообразной функции. При этом сравнение следует проводить только тех гармонических составляющих, номера которых удовлетворяют соотношению (17).

Оценим пределы применимости формулы (20). Эта формула справедлива для сферически расходящихся волн пилообразной формы. Следовательно, при использовании плоского излучателя диаметром  $D$  должно выполняться неравенство

$$x > x_0 > \frac{D^2}{4\lambda} > \frac{\lambda \rho c^2}{\pi(\gamma + 1)p}. \quad (25)$$

Здесь величина  $D^2/4\lambda$  характеризует то расстояние от плоского излучателя, на котором начинается сферическое расхождение волны.

Из неравенства следует, что чем больше значение  $x$ , тем лучше выполняется закон сферического расхождения волны. Но с увеличением  $x$  заметно спадает амплитуда волны и уменьшается максимальный номер  $n$ , для которого еще справедливо неравенство (17). Следовательно, значение  $x$  должно быть выбрано при измерениях такое, чтобы в точке  $x$  еще

выполнялось неравенство (17), где  $n$  — высший номер гармоники, входящий в рабочий диапазон частот.

Практически рабочий интервал значений  $x$  и  $n$  определяется очень легко. Для этого необходимо определить спадание амплитуд гармоник волны с увеличением расстояния от излучателя. Для тех значений  $n$  (а следо-

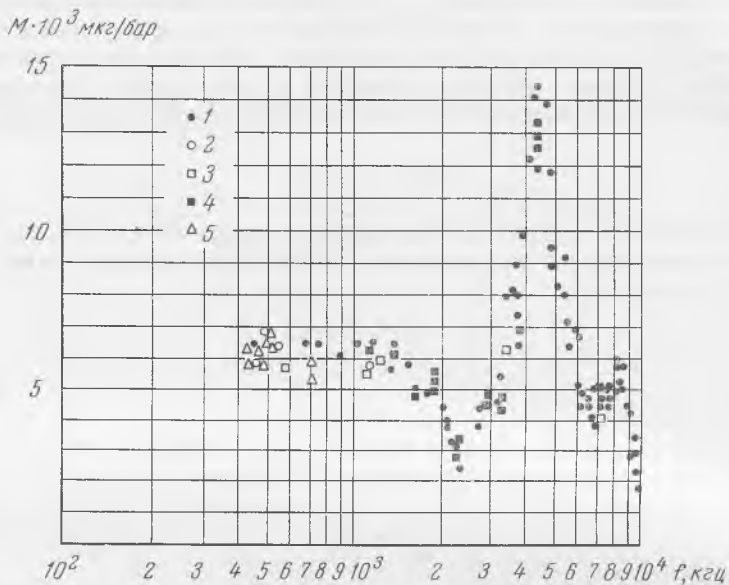


Рис. 51. Результат градуировки миниатюрного приемника ультразвука различными методами

вательно, и  $x$ ), при которых выполняется неравенство (17), амплитуды всех гармоник должны спадать одинаково. При больших значениях  $n$  гармоники будут спадать заметно быстрее.

Описанным методом сравнительно легко можно градуировать приемники ультразвука в диапазоне частот 0,4—30 Мгц. Основным преимуществом метода является то, что излучатель работает на одной (основной) частоте, а абсолютная градуировка производится сразу на 20—30 частотах, соответствующих гармоническим составляющим основной частоты.

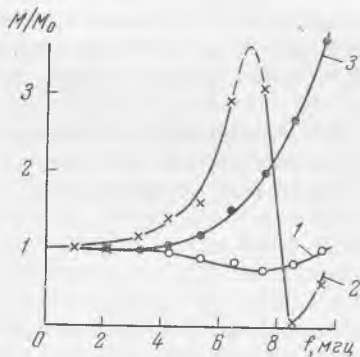


Рис. 52. Частотные характеристики чувствительности трех различных приемников ультразвука, определенные с помощью пилообразной волны

Оценим точность описываемого метода градуировки. Учитывая простоту определения  $p_0/p_x$ , квадратичную погрешность измерений можно свести к весьма малой величине (около 3—5%). Но в выражение (20) входит величина  $\gamma$ , точное значение которой для воды пока неизвестно. В ряде работ для величины  $\gamma$  приводятся значения, заключенные в интервале от 6 до 7. Анализ большого объема экспериментальных данных позволяет принять для  $\gamma$  значение  $6,5 \pm 10\%$ . Так что точность абсолютной градуировки приемников ультразвука может быть принята равной  $\pm 13 \div 15\%$ , а точность определения частотных характеристик приемников ультразвука — равной  $8 \div 10\%$ .

На рис. 51 представлены результаты градуировки описанным способом миниатюрного приемника с размером чувствительного элемента около 0,35 мм (1), результаты градуировки методом взаимности по полю (2), а также результаты градуировки методом сравнения с градуированным плоским радиометром (3) и сферическим миниатюрным радиометром (4). Кроме того, на рисунке нанесены результаты градуировки методом сравнения с образцовым приемником ультразвука с известной чувствительностью, градуированным во ВНИИФТРИ (5).

На рис. 52 представлены частотные характеристики ряда приемников, определенные описанным способом (обозначения те же, что и на рис. 51).

## § 2. Метод, основанный на измерении радиационного давления

Согласно соотношению (6), давление звука на препятствие, помещенное в ультразвуковое поле, при нормальном падении звука может быть записано в виде

$$\mathcal{P} = (1 + R) \frac{I}{c}, \quad (26)$$

где в случае плоской волны  $I = \frac{p^2}{\rho c}$  (здесь  $p$  — эффективное значение давления).

Если звуковая волна частоты  $\omega$  модулирована по амплитуде частотой  $\Omega$ , то радиационное давление будет иметь переменную составляющую частоты  $\Omega$ , амплитуда которой равна

$$\mathcal{P}_{\Omega} = (1 + R) \frac{m p_{\omega}^2}{\rho c^2}, \quad (27)$$

где  $m$  — глубина модуляции.

Уже в самом соотношении (27) заключена возможность определения частотных характеристик чувствительности приемников ультразвука в широком диапазоне частот [12]. Действительно, при сохранении постоянными значений  $m$ ,  $\omega$  и  $p_{\omega}$ , величина  $\mathcal{P}_{\Omega}$  также будет оставаться постоянной при изменении частоты модуляции  $\Omega$  в широких пределах.

Если приемник ультразвука принимает переменную составляющую радиационного давления при двух различных частотах модуляции  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ , то величина амплитуды электрического напряжения на выходе приемника запишется в виде

$$U_{\Omega_1} = M_{\Omega_1} \mathcal{P}_{\Omega}$$

и

$$U_{\Omega_2} = M_{\Omega_2} \mathcal{P}_{\Omega}. \quad (28)$$

Здесь  $M_{\Omega_1}$  и  $M_{\Omega_2}$  — чувствительность приемника ультразвука на частотах соответственно  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ .

Из (28) получаем

$$\frac{M_{\Omega_2}}{M_{\Omega_1}} = \frac{U_{\Omega_2}}{U_{\Omega_1}}. \quad (29)$$

Фиксируя  $\Omega_1$  и изменяя  $\Omega_2$ , легко получить отношение чувствительности приемника в некотором диапазоне частот и чувствительности на частоте  $\Omega_1$ .

Таким способом можно градуировать приемники ультразвука лишь в диапазоне частот модуляции, который должен быть существенно ниже несущей частоты. Однако если приемник ультразвука способен принимать ультразвуковые колебания не только в диапазоне частот модуляции,

но и в диапазоне несущих частот, то некоторые видоизменения описанного метода позволяют распространить его на область несущих частот.

В этом случае к соотношениям (28) добавится еще одно:

$$U_{\omega} = M_{\omega} p_{\omega}, \quad (30)$$

где  $U_{\omega}$  и  $M_{\omega}$  — соответственно электрическое напряжение на выходе и чувствительность приемника ультразвука на несущей частоте  $\omega$ . Положим  $\Omega$  и  $m$  постоянными, тогда, используя соотношения (27), (28) и (30), для двух значений  $\omega_1$  и  $\omega_2$  можно записать:

$$U_{\Omega\omega_1} = (1 + R) \frac{M_{\Omega} m}{\rho c^2} \left( \frac{U_{\omega_1}}{M_{\omega_1}} \right)^2 \quad (31)$$

и

$$U_{\Omega\omega_2} = (1 + R) \frac{M_{\Omega} m}{\rho c^2} \left( \frac{U_{\omega_2}}{M_{\omega_2}} \right)^2. \quad (32)$$

Отсюда получаем

$$\frac{M_{\omega_2}}{M_{\omega_1}} = \left( \frac{U_{\omega_2}}{U_{\omega_1}} \right) \sqrt{\frac{U_{\Omega\omega_1}}{U_{\Omega\omega_2}}}. \quad (33)$$

Как показал В. А. Зверев [38], описанный метод может быть использован и для абсолютной градуировки приемников и излучателей ультразвука. Действительно, из соотношений (27), (28) и (30) можно получить

$$p_{\omega} = \frac{\rho c^2}{(1 + R)m} \frac{M_{\omega}}{M_{\Omega}} \frac{U_{\Omega}}{U_{\omega}}, \quad (34)$$

что дает значение  $p_{\omega}$  в функции легко измеримых величин. Абсолютное значение амплитуды ультразвукового давления достаточно для проведения абсолютной градуировки приемников ультразвука.

Коэффициент отражения  $R$  для материала приемника в большинстве случаев известен. Величины  $m$  и  $U_{\Omega}/U_{\omega}$  определяются в процессе измерений, а отношение  $M_{\omega}/M_{\Omega}$  определяется следующим образом. Ультразвуковая волна некоторой частоты  $\omega_0$ , модулируемая частотами  $\omega$  и  $\Omega$  (можно одновременно), посылается на приемник. Как следует из (27), при этом равным глубинам модуляции соответствуют равные давления. По отношению напряжений  $U_{\Omega}$  и  $U_{\omega}$ , получаемых в этом опыте, определяется  $M_{\omega}/M_{\Omega}$ .

Градуировка излучателей производится аналогично. Роль радиационного давления здесь играет «отдача», испытываемая поверхностью излучателя при испускании волны.

Измерение величины «отдачи» с помощью приемника ультразвука, помещенного вне луча ультразвуковых волн частоты  $\omega$ , модулированных частотой  $\Omega$ , и настроенного на частоту модуляции, позволяет определить резонансные характеристики излучателей. В этом случае при изменении несущей частоты  $\omega$  и при постоянной частоте модуляции  $\Omega$  электрическое напряжение на выходе приемника меняется в соответствии с резонансной кривой излучателя. При этом абсолютная градуировка поля излучателя может быть проведена описанным выше способом с использованием соотношения (34).

Следует отметить, что описанный метод не применим в области резонансных частот приемников, так как в этом случае коэффициент отражения  $R$  не остается постоянным.

### § 3. Абсолютная градуировка с помощью ударной волны

Сущность метода заключается в том, что чувствительность приемника ультразвука находится по величине электрического напряжения, возникающего на выходе приемника под действием ударной волны. Амплитуда волны вычисляется по измеряемой скорости ее распространения. Скорость ударной волны и напряжение на выходе приемника определяются по осциллограмме, фотографируемой с экрана осциллографа. Этот метод пригоден для градуировки пьезоэлектрических приемников ультразвука, имеющих постоянную чувствительность в диапазоне частот 10—100 кгц.

Блок-схема установки для градуировки миниатюрных цилиндрических приемников ультразвука [39] указанным методом приведена на рис. 53.

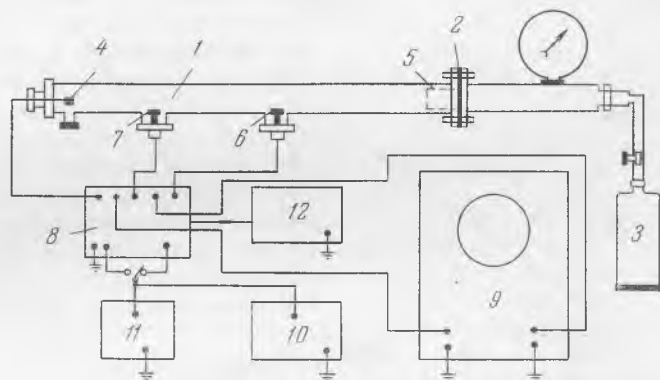


Рис. 53. Блок-схема установки

Ударная труба 1 диаметром 50 мм и толщиной стенки 5 мм состоит из отсеков длиной 500 и 1400 мм. Отсеки разделены диафрагмой 2 из фотопленки, зажатой между фланцами, снабженными уплотнительными резиновыми кольцами. В короткий отсек из баллона 3 подается через редуктор сжатый воздух под давлением около 7 атм, пока диафрагма не прорвется. После этого во второй отсек устремляется волна давления. Чтобы предохранить находящийся во втором отсеке градуируемый приемник 4 от ударов обрывков диафрагмы, между фланцами зажимается вкладыш в виде трубки диаметром 50 мм и длиной 50 мм, затянутой пропаянной латунной сеткой из проволоки 0,5 мм с ячейкой 5 × 5 мм<sup>2</sup>. Сетку предохраняет от перебивания проволочек после нескольких прорывов диафрагмы пропайка.

Волна давления, распространяясь во втором отсеке трубы, превращается в ударную волну с крутым передним фронтом и пологим спадом давления за фронтом. Давление падает тем медленнее, чем больше объем первого отсека трубы. Давление непосредственно за фронтом связано со скоростью распространения ударной волны соотношением

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2\gamma M_1^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1}, \quad (35)$$

где  $p_2$  и  $p_1$  — соответственно давление за и перед фронтом ударной волны ( $p_1$  равно начальному давлению во втором отсеке);  $M_1$  — отношение скорости ударной волны к скорости звука при данной температуре;  $\gamma$  — отношение теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме.

Ударная волна отражается от заглушки на конце второго отсека. Давление за фронтом отраженной волны  $p_3$  находится из соотношения

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{2\gamma M_2^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1}, \quad (36)$$

где

$$M_2^2 = \frac{2\gamma M_1^2 - (\gamma - 1)}{2 + (\gamma - 1) M_1^2}. \quad (37)$$

Величина  $p_2$  может быть принята равной давлению за фронтом падающей волны, если расстояние от заглушки до точки наблюдения не слишком велико и давление за фронтом падающей волны не успевает заметно снизиться.

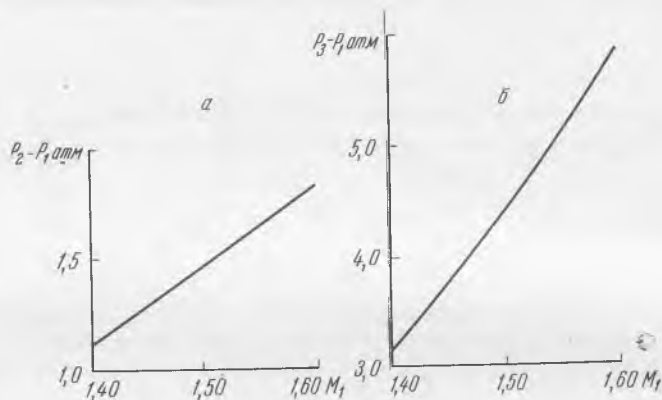


Рис. 54. Зависимость избыточного давления за фронтом падающей волны (а) и отраженной волны (б) от скорости распространения волны

Величина  $\gamma$  в формулах предполагается постоянной и равной 1,4, что справедливо для давлений в ударной волне порядка нескольких атмосфер. При более высоких давлениях величина  $\gamma$  может изменяться из-за диссоциации газа вследствие разогрева его на фронте волны.

Приведенные формулы дают возможность построить (рис. 54) соотношения

$$p_2 - p_1 = f(M_1) \quad (38)$$

и

$$p_3 - p_1 = f_1(M_1), \quad (39)$$

которые представляют собой зависимости избыточного давления за фронтом падающей и отраженной волн в отсеке трубы, где распространяется ударная волна, от скорости ее распространения. Обычно  $p_1$  устанавливается равным атмосферному давлению.

Для определения скорости распространения ударной волны служит устройство, с помощью которого измеряется время пробега этой волной известного пути. Чувствительные элементы устройства состоят из датчиков (6 и 7 на рис. 53), смонтированных в стенку второго отсека трубы. Датчик 6 находится на расстоянии 700 мм от диафрагмы, что достаточно для формирования ударной волны, и на расстоянии 500 мм от датчика 7.

Когда ударная волна достигает датчика 6, включается разветвка осциллографа, и на ней появляются метки времени. При достижении ударной волной датчика 7 метки времени выключаются. Скорость ударной волны определяется как отношение расстояния между датчиками к времени, необходимому для его пробега.

Датчик монтируется в гнезде заподлицо с внутренней поверхностью трубы, чтобы не исказить ударную волну. Резиновые прокладки предохраняют его от воздействия упругих волн, распространяющихся по стенке трубы после прорыва диафрагмы.

Градулируемый приемник устанавливается либо по оси трубы на торцевой заглушке, либо вблизи нее в стенке трубы. Возможность изменения положения приемника позволяет обследовать его чувствительность при разных ориентациях относительно направления распространения ударной волны.

Радиотехническая часть 8 установки предназначена:

1) обеспечивать однократный запуск развертки осциллографа 9 сигналом от первого датчика и не допускать перезапуска развертки отраженными волнами;

2) обеспечивать точность запуска, т. е. вырабатывать запускающие импульсы с достаточно крутым фронтом;

3) отмечать с достаточной точностью момент прихода ударной волны ко второму датчику;

4) иметь достаточно широкую полосу пропускаемых частот, чтобы не возникли искажения сигнала от градулируемого приемника;

5) обеспечивать возможность градуировки канала усиления электрическим напряжением известной величины.

Блок-схема радиотехнической части, показанная на рис. 55, имеет четыре основных узла:

Узел I формирует стартовый импульс для запуска развертки осциллографа из импульса напряжения отрицательной полярности, поступающего от датчика 6 (рис. 53) на выход 1 узла I. Стартовый импульс с выхода 1 поступает на вход блока развертки осциллографа.

Узел II формирует метки времени. Для этого на вход 5 при замкнутом включателе  $B_1$  подается непрерывное синусоидальное напряжение от специального генератора (10 на рис. 53) с частотой 50 кГц, которое преобразуется в последовательность отрицательных импульсов, служащих метками времени. Последние с выхода 2 поступают на вход усилителя канала вертикального отклонения луча осциллографа.

Узел III формирует электрический сигнал, выключающий метки времени в момент, когда ударная волна приходит к датчику 7, подключенному ко входу 2.

Узел IV служит для усиления сигнала, поступающего с градулируемого приемника, подключенного к входу 3. Усиленный сигнал через выход 2 поступает на вход осциллографа. Вход 4 служит для подачи градуировочного электрического напряжения известной величины и частоты 50 кГц. При этом включатель  $B_1$  разомкнут, а включатель  $B_2$  замкнут. Однократный запуск осциллографа для фотографирования градуировочного сигнала производится нажатием специальной кнопки, предусмотренной в узле I.

Следует иметь в виду, что если за фронтом отраженной волны на небольших расстояниях от заглушки скорость частиц газа близка к нулю, то за фронтом падающей волны она может достигать весьма больших значений. Скорость частиц воздуха за фронтом падающей волны может быть вычислена по формуле

$$v = c_{уд} \frac{2(M_1^2 - 1)}{(\gamma + 1)M_1^2} \quad (40)$$

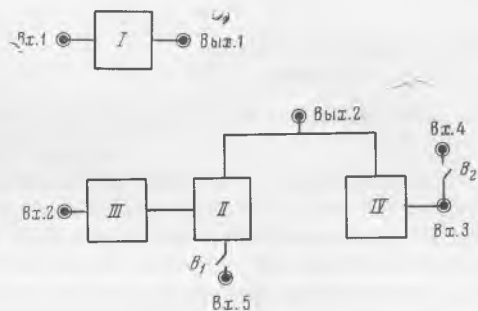


Рис. 55. Блок-схема радиотехнической части



Если, например, скорость распространения ударной волны  $c_{уд}$  равна 500 м/сек, что соответствует  $M_1 = 1,46$ , то  $v = 220$  м/сек. Поэтому при градуировке в падающей волне необходимо принимать во внимание, что при обтекании приемника потоком воздуха с большой скоростью давление на поверхности чувствительного элемента приемника может существенно отличаться от расчетного. Действительно, градуировка приемника, вводимого через боковой сальник, показала, что чувствительность при градуировке в падающей волне меньше, чем при градуировке в отраженной (табл. 2).

Таблица 2

Результаты градуировки цилиндрического приемника ультразвука в падающей и отраженной ударной волнах

	Угол, определяющий поворот приемника относительно оси держателя $\varphi$ , град								
	0	45	90	135	180	225	270	315	360
Чувствительность, $\text{в/ат.м}$ в падающей волне,	0,22	0,217	0,195	0,197	0,228	0,190	0,165	0,198	0,23
в отраженной волне	0,29	0,304	0,311	0,304	0,297	0,300	0,303	0,313	0,303

При градуировке приемника, введенного в трубу через боковой сальник, в падающей волне обнаруживается зависимость чувствительности приемника от угла поворота вокруг его оси, связанная, по-видимому, с неоднородностью толщины стенок приемника. Чувствительность того же приемника, установленного вдоль оси трубы, одинакова как в падающей, так и в отраженной волнах и равна чувствительности при боковом падении отраженной волны.

Таким образом, чувствительность цилиндрических приемников, подобных описанным в работе [13], следует измерять при боковом падении как отраженной, так и падающей волн, если диаметры чувствительного элемента и держателя равны.

Точность измерения определяется ошибками в определении давления в ударной волне и электрического напряжения на выходе приемника. Ошибка в давлении определяется ошибкой измерения времени пробега ударной волной расстояния между датчиками, которая составляет не более 2%. Ошибка в измерении времени пробега влечет за собой погрешность в определении числа  $M_1$ . Для интервала  $M_1$  от 1,4 до 1,5 результирующая погрешность определения величины  $p_3 - p_1$  равна 9%.

Точность прибора, при помощи которого измеряется напряжение на выходе кабеля, входящего в комплект приемника, равна 5%. Таким образом, погрешность градуировки приемников на описанной установке не превышает 14%. Разброс величины чувствительности приемника в пределах одной серии измерений и между сериями не превышает 5%.

#### § 4. Сброс статического давления

Этот метод чрезвычайно прост и не требует специального источника звука. Основан он на быстром сбросе статического давления, действием которого был подвергнут чувствительный элемент приемника, помещенный в камеру малого объема, закрытую диафрагмой [39]. В камеру под известным давлением подается воздух. При некотором давлении диафрагма прорывается и давление падает до атмосферного. Возникающее на выходе приемника электрическое напряжение осциллографируется. Чувствительность приемника определяется как отношение максимального напряжения к давлению в камере перед прорывом диафрагмы.

Конструкция камеры давления показана на рис. 56. Это толстостенная металлическая бомба, внутренний объем которой равен нескольким кубическим сантиметрам; верхней крышкой служит диафрагма 1, зажатая по краю ввинчивающимся кольцом, снабженным резиновым уплотнением 2. В качестве материала для диафрагмы может быть применена фотопленка шириной 35 мм. При диаметре свободной части диафрагмы 23 мм диафрагма прорывается при 10—13 атм. Сжатый воздух подается в бомбу

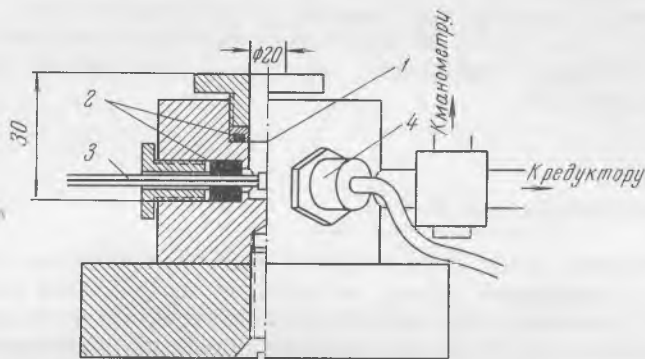


Рис. 56. Конструкция камеры давления

из баллона через редуктор 4 достаточно медленно, чтобы можно было измерить давление в бомбе перед прорывом диафрагмы. За время подъема давления в бомбе электрический заряд с пьезоэлемента градуируемого приемника 3 должен успевать стекать через входное сопротивление осциллографа, к которому подсоединен приемник. Однако входное сопротивление должно быть достаточно высоким, чтобы за время сброса давления после прорыва диафрагмы электрическое напряжение на выходе

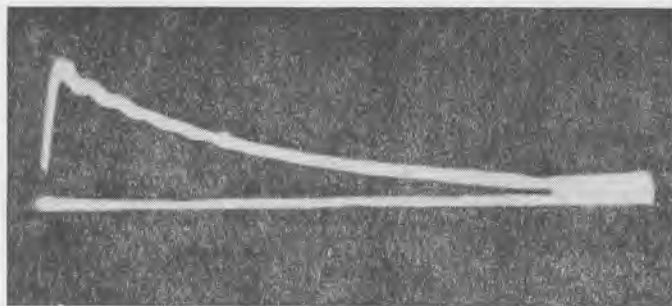


Рис. 57. Рабочая осциллограмма давления

приемника не успело существенно снизиться из-за стекания пьезозарядов приемника. Поэтому давление должно сбрасываться по возможности быстро, что и вынуждает уменьшать внутренний объем бомбы. При указанном объеме бомбы сброс давления происходил приблизительно за 200 мксек. Следовательно, постоянная времени  $RC$  (где  $C$  — емкость пьезоэлемента, включая подводящий кабель и вход осциллографа, а  $R$  — результирующее сопротивление, состоящее из параллельно включенных сопротивлений входа осциллографа и утечки гидрофона) должна быть по крайней мере на порядок больше 200 мксек.

После прорыва диафрагмы давление вследствие инерции расходящегося потока газа, вытекающего из бомбы, падает несколько ниже атмосферного и после нескольких колебаний стремится к атмосферному. Колебания

напряжения, происходящие с периодом, приблизительно равным 500 мксек, отмечаются приемником. Рабочая осциллограмма приведена на рис. 57. При определении чувствительности необходимо усреднить колебания напряжения и отнести его к показанию манометра перед прорывом диафрагмы. Когда значения избыточного давления по сравнению с атмосферным достигают примерно 10 атм и более, возможная ошибка, связанная с тем, что колебания давления в процессе установления не учитываются, несущественна. Например, при анализе осциллограммы рис. 57 ошибка не превышает 10%. Если же величина избыточных давлений составляет несколько атмосфер, усреднение колебаний необходимо производить возможно тщательнее.

## § 5. Гидростатический метод

Гидростатический метод градуировки пьезоэлектрических приемников [40], как и предыдущий метод, не требует излучателей ультразвуковой энергии, и поэтому градуировка производится в отсутствие звукового поля. Сущность метода состоит в том, что приемник подвергается воздействию гидростатического давления, изменяющегося со временем по линейному закону. В этом случае чувствительность приемника определяется соотношением

$$M = \frac{k}{C + C_x} \frac{\omega}{\{[1/R(C + C_x)]^2 + \omega^2\}^{1/2}}; \quad (41)$$

здесь  $k$  — постоянная приемника, которая должна быть предварительно определена;  $C + C_x$  — сумма емкости пьезоэлемента и входа схемы, к которой подключен пьезоэлемент;  $R$  — сопротивление нагрузки пьезоэлемента;  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  — частота). Второй множитель в формуле (41) определяет частотную зависимость чувствительности приемника в области дорезонансных частот.

Постоянная приемника может быть определена следующим образом. Пусть к пьезоэлементу приложено механическое напряжение  $S$ ; тогда

$$Q = kS, \quad (42)$$

где  $Q$  — электрический заряд на обкладках пьезоэлемента.

Если параллельно пьезоэлементу подключены емкость и активное сопротивление, то можно записать

$$Q = UC_x = kS - \int_0^t I dt, \quad (43)$$

где

$$I = \frac{U}{R} + C \frac{dU}{dt} \quad (44)$$

( $U$  — электрический потенциал на обкладках пьезоэлемента).

Дифференцируя соотношение (43) и используя (44), получим

$$\frac{dU}{dt} + \frac{U}{R(C_x + C)} = \frac{k}{C_x + C} \frac{dS}{dt}. \quad (45)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$U = \frac{k}{C_x + C} e^{-\frac{t}{R(C_x + C)}} \int_0^t e^{\frac{t}{R(C_x + C)}} \frac{dS}{dt} dt. \quad (46)$$

Начальные условия взяты в виде

$$U = \frac{dS}{dt} = t = 0.$$

Если приемник погружен в жидкость на глубину  $h$ , то на него действует гидростатическое давление

$$p = p_0 + \rho gh, \quad (47)$$

где  $p_0$  — атмосферное давление;  $\rho$  — плотность жидкости;  $g$  — ускорение силы тяжести.

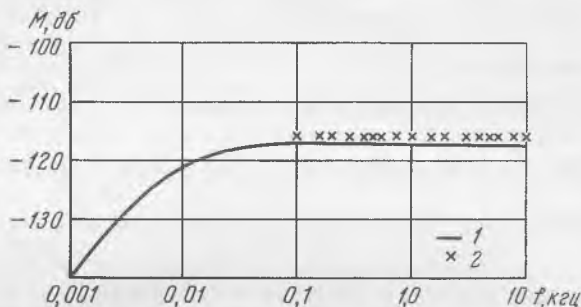


Рис. 58. Результаты градуировки пьезоприемника гидростатическим методом (1) и одним из известных методов (2)

Будем теперь приемник поднимать из жидкости с постоянной скоростью. Тогда давление на приемнике будет изменяться следующим образом:

$$\frac{dp}{dt} = r = \frac{dS}{dt} = \text{const} = \rho g \frac{dh}{dt}, \quad (48)$$

и соотношение (46) легко интегрируется. В результате получаем

$$U = kRr; \quad (49)$$

отсюда

$$k = \frac{U}{Rr}. \quad (50)$$

Таким образом, процесс градуировки приемника сводится к измерению постоянного электрического напряжения на выходе приемника и скорости вытаскивания (или погружения) последнего из жидкости. Кроме того, требуется знать величины  $R$ ,  $C$  и  $C_x$ .

На рис. 58 показаны результаты градуировки пьезоэлектрического приемника описанным способом 1 и одним из обычных способов с использованием звукового поля 2. Приемник имел следующие параметры:

$$C + C_x = 0,0225 \text{ мкф}, \quad R = 10 \text{ Ом}.$$

Следует подчеркнуть практическую ценность описанного метода для градуировки приемников в области низких частот, при которых градуировка в звуковом поле встречает известные затруднения.

## § 6. Метод топографической съемки

Метод топографической съемки ультразвукового поля в целях градуировки ультразвуковых приемников был предложен Дегруа [43] для плоского излучателя. Ю. Я. Борисов [11] несколько видоизменил этот метод в связи с применением фокусирующего излучателя. Здесь будет из-

ложен видоизмененный метод, так как именно он нашел применение в Акустическом институте.

Сущность метода заключается в том, что измеряется полная мощность излучения и распределение поля в фокальной плоскости фокусирующего излучателя. Чувствительность градуируемого приемника ультразвука определяется по формуле

$$M = \frac{U}{p} = \sqrt{\frac{2\pi S}{\rho c W}} \text{ мв/бар}, \quad (51)$$

где  $W$  — полная мощность излучения,

$$S = \int U_r \cdot r dr. \quad (52)$$

Соотношения (51) и (52) могут быть выведены путем следующих рассуждений.

Интенсивность в плоской бегущей волне может быть записана в виде

$$I = \frac{p^2}{\rho c}, \quad (53)$$

где  $p$  — эффективное значение звукового давления.

Чувствительность приемника ультразвука определим как

$$M = \frac{U}{p}, \quad (54)$$

где  $U$  — электрическое напряжение, снимаемое с приемника при давлении  $p$ .

С учетом (54) соотношение (53) может быть переписано следующим образом:

$$I = \frac{U^2}{M^2 \rho c}. \quad (55)$$

Так как в фокальной области концентратора волна имеет плоский фронт, то общая мощность излучения в фокальной области выразится как

$$W = 2\pi \int I_r \cdot r dr = \frac{2\pi}{M^2 \rho c} \int U_r^2 \cdot r dr, \quad (56)$$

где  $r$  — радиальная координата в фокальной плоскости. Отсюда легко получается формула (51).

Полная мощность излучения измеряется с помощью радиометра. Сняв распределение звукового давления в двух взаимно перпендикулярных направлениях и усреднив полученные значения в точках, симметричных относительно оси излучения, необходимо построить кривые распределения величины  $rU_r^2$  от  $r$ . Тогда значение  $S$  определяется как площадь, ограниченная полученной кривой.

Метод топографической съемки приемлем лишь при симметричной форме поля. При отсутствии симметрии кривую распределения приходится искусственно симметризовать, что приводит к значительным погрешностям. Оценка показывает, что при наличии симметрии погрешность градуировки по описываемому методу не превышает 20%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. И. Г. Михайлов, В. А. Шутлов. Прибор для измерения абсолютной интенсивности ультразвука. Акуст. ж., 3, 4, 379, 1957.
2. Л. К. Зарембо. О термоэлектрических приемниках ультразвука. Измерительная техника, 5, 74, 1958.
3. И. Т. Соколов. Применение математической теории Кинга к радиометрическим измерениям звуковых давлений в жидкости. ЖТФ, 15, 4, 1945.
4. W. G. Cady, Curtis E. Gittings. On the Measurement of Power Radiated from an Acoustic Source. JASA, 25, 5, 892, 1953.
5. Л. Д. Розенберг. Энергетические соотношения при ультразвуковой кавитации. Ультразвуковая техника, 6, 1964.
6. Л. Д. Розенберг. Об оценке кавитационной эффективности акустической энергии. Акуст. ж., 11, 1, 121, 1965.
7. И. Г. Михайлов, В. А. Шутлов. Дифракция света на ультразвуковых волнах большой амплитуды. Акуст. ж., 3, 2, 203, 1957.
8. K. L. Zankel, E. A. Hiedemann. Diffraction of light by Ultrasonic Waves Progressing with Finite but Moderate Amplitudes in Liquides. JASA, 31, 1, 44, 1959.
9. E. I. Meuer. Some New Measurements on Sonically Induced Cavitation. JASA, 29, 1, 4, 1957.
10. I. Коррелманн. Beiträge zur ultraschallmeßtechnik in Flüssigkeiten, Acustica, 2, 92, 1952.
11. Ю. Я. Борисов. Волноводные щупы для измерения звукового давления в режиме кавитации. Контрольно-измерительные ультразвуковые приборы. Сб. докладов, Москва, ЦИНТИ Электропр., 1960, 123.
12. Е. В. Романенко. Миниатюрные пьезоэлектрические приемники ультразвука. Акуст. ж., 3, 4, 342, 1957.
13. Н. А. Рой, Е. В. Романенко. Широкополосные ультразвуковые приемники. ПНТПО, 1958, тема 38, № П-58,169/6,3.
14. Е. В. Романенко. Конструкция и применение миниатюрных приемников ультразвука. Техничко-информационный бюллетень. ЦКБ ЭТО, 1960, 1/3, 37.
15. Е. В. Романенко. Экспериментальное исследование распространения волны конечной амплитуды в жидкостях. Кандидатская диссертация. Москва, Акуст. ин-т, 1961.
16. Е. В. Романенко. Сферический приемник ультразвука. Авт. свидетельство на изобретение, № 119026, 1958.
17. А. А. Аняньева. Керамические приемники звука. Москва, 1963.
18. И. П. Голямина. Электроакустические преобразователи из ферритов, ПНТПО, 1959, тема 38, №П-59-57/1.
19. И. П. Голямина, А. Д. Соколов, В. К. Чулкова. Испытания опытных ультразвуковых приемников из ферритов. Акуст. ж., 3, 3.288, 1957.
20. И. П. Голямина, В. К. Чулкова, В. Орлов. Исследование цилиндрических приемников ультразвука из никель-цинковых ферритов. Отчет Акустического института. Москва, 1958.
21. Л. Д. Розенберг, М. Г. Сиротюк. Причины, ограничивающие акустическую мощность преобразователя, работающего в жидкости. Контрольно-измерительные ультразвуковые приборы. Сб. докладов. Москва, ЦИНТИ Электропр., 1960, стр. 157.
22. Е. В. Романенко. К вопросу о гидроакустике и гидродинамике рыб и дельфинов. Отчет Акустического института Москва, 1963.
23. А. И. Петренко. Приемник с механической трансформацией звукового давления. Дипломная работа. Моск. ин-т радиоэлектроники и горн. электро-механики, 1964.
24. Ю. Б. Семенников. Входные цепи усилителей, работающих от пьезоэлектрических звукоприемников. Тр. комиссии по акустике, 7, 74, 1953.
25. S. Timoschenko, S. Woïnowsky — Krieger. Theory of Plates and Shells. New York, 1959.  
(см. перевод: С. Тимошенко, С. Войновский - Кригер. Пластинки и оболочки. ГИФМЛ, 1963).
26. L. Bergmann. Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik. Zürich, 1954 (См. перевод: Л. Бергман. Ультразвук и его применение в науке и технике. ИЛ, 1957).
27. Г. П. Мотулевич, И. Л. Фабелинский, Л. Н. Штейнгауз. Абсолютный акустический микрорадиометр. ДАН СССР, 70, 1, 29, 1950.
28. K. Budal, E. Nöy and H. Olsen. Measurements of Acoustic Radiation Force. JASA, 31, 11, 1536, 1959.
29. М. Е. Архангельский, В. Я. Афанасьев. Исследование фотодиффузионного метода визуализации ультразвуковых полей. Акуст. ж., 3, 3, 214, 1957.

30. А. А. Янпольский. Абсолютная градуировка электроакустических преобразователей методом взаимности в квазисферическом поле. Тр. комиссии по акустике, 8, 37, 21, 1955.
31. R. D. Fay. Plane Sound Waves of Finite Amplitude. JASA, 3, 2, 222, 1931.
32. З. А. Гольдберг. Плоские акустические волны конечной амплитуды в вязкой теплопроводной среде. Кандидатская диссертация. Москва, Акуст. ин-т, 1958.
33. К. А. Наугольных. Некоторые вопросы теории распространения звуковых волн конечной амплитуды. Кандидатская диссертация. Москва, Акуст. ин-т, 1959.
34. В. А. Буров, В. А. Красильников. Непосредственное наблюдение искажения формы интенсивных ультразвуковых волн в жидкости. ДАН СССР, 118, № 5, 920, 1958.
35. Е. В. Романенко. Установка для калибровки гидрофонов. ПНТПО, 1960, тема 34, № П-60-59/5, 21.
36. Е. В. Романенко. Способ определения частотных и фазовых характеристик приемников ультразвука. Авт. свидетельство на изобретение, № 119025, 1958.
37. Е. В. Романенко, К. А. Наугольных. Способ градуирования акустических преобразователей. Авт. свидетельство на изобретение, № 157619, 1963.
38. В. А. Зверев. О возможности абсолютной калибровки излучателей и приемников звука по давлению радиации без использования радиометра. Акуст. ж., 2, 4, 1956, 378.
39. Н. А. Рой, Д. П. Фролов. Установки для калибровки широкополосных приемников давления. ПНТПО, 1961, тема 36, № П-61-7/2.
40. F. W. Raymond. Nonacoustical Method for Measuring Sensitivity of a Piezoelectric Hydrophone. JASA, 35, 1, 70, 1963.
41. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. ГИТТЛ, Москва, 1954.
42. F. E. Borgnis. Theory of Acoustic Radiation Pressure. Rev. Mod. Phys., 25, 3, 1953.
43. M. Degrouas. Proposition de normalisation de l'expression de la puissance fournie par un projecteur à ultrasons. Ann. Télécomm. 9, 4, 99, 1954.
44. F. M. Morse. Vibration and Sound. 1948 (См. перевод: Ф. Морз. Колебания и звук. ГИТТЛ, 1949, стр. 378).