

Академия Наук СССР
Акустический журнал
Том V, 1959, вып. 1.

Е. В. Романенко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
СФЕРИЧЕСКИХ ВОЛН КОНЕЧНОЙ АМПЛИТУДЫ

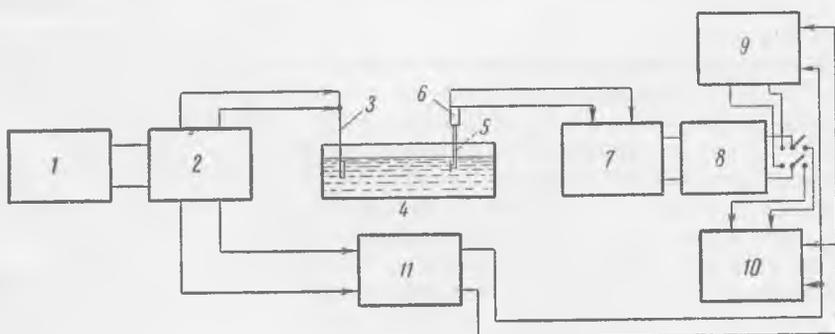
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
СФЕРИЧЕСКИХ ВОЛН КОНЕЧНОЙ АМПЛИТУДЫ**

Е. В. Романенко

Экспериментально исследовано распространение сферически расходящихся волн конечной амплитуды при импульсном излучении на частоте 1,15 мГц и амплитуде давления у поверхности излучателя до 26 атм. Результаты эксперимента сопоставлены с теорией, причем получено удовлетворительное согласие. Описаны конструкции излучателя и приемников ультразвука, использованных при экспериментах. Описан метод определения частотных характеристик приемников в широком диапазоне частот, основанный на использовании изменения формы волны конечной амплитуды при ее распространении.

При распространении волны конечной амплитуды форма ее искажается; волна, первоначально синусоидальная, постепенно принимает пилообразную форму, что соответствует нарастанию градиентов скорости и температуры. С другой стороны, вязкость и теплопроводность среды приводят к уменьшению этих градиентов. Поэтому степень искажения формы волны зависит от соотношения вязкости и теплопроводности, с одной стороны, и нелинейных эффектов — с другой. В сферической волне конечной амплитуды уменьшение амплитуды давления с расстоянием происходит не только вследствие поглощения, но и вследствие большого расхождения волны. Ввиду этого нелинейные эффекты в сферической волне должны проявляться значительно меньше, чем в плоской.

В настоящей работе дается описание установки и результатов экспериментального исследования распространения сферических волн конечной амплитуды в водопроводной воде вдали от сферического излучателя.



Фиг. 1

Блок-схема установки представлена на фиг. 1. Напряжение от генератора ГСС-6 1 преобразуется в модуляторе-усилителе 2 в радиоимпульсы длительностью 20—40 мксек с частотой повторения 5—50 гц, которые затем усиливаются и подаются на пьезоизлучатель 3. Волны от излучателя распространяются в водопроводной воде, заполняющей ванну 4 с размерами 50 × 50 × 200 см и принимаются широкополосным приемником 5. Принятый акустический сигнал через согласующий катодный повторитель 6,

усилитель осциллографа СИ-1 7 и второй согласующий катодный повторитель 8 подается на осциллографы ОК-17М 9 и RFT 10.

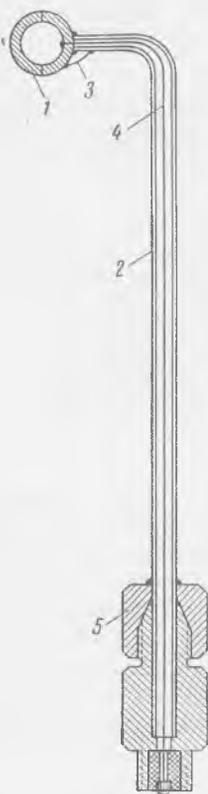
Осциллограф 10 служит для контроля за юстировкой приемника ультразвука в поле излучателя, а с экрана осциллографа 9 производится фотографирование усиленного акустического сигнала. Блок задержки 11 позволяет наблюдать на экранах осциллографов 9 и 10 акустический сигнал, задержанный по времени относительно электрического сигнала на излучателе на 1—1,5 мсек. Приемная радиоаппаратура имеет полосу пропускания до 10 мГц и линейную фазовую характеристику в этом диапазоне частот. Для фотографирования акустического сигнала использовалась аэрофотопленка с чувствительностью по Сд 1000 ед. ГОСТ.

Сферический излучатель (фиг. 2) изготовлен из двух сваренных друг с другом стеклом полусфер из керамического титаната бария 1 с внешним диаметром 16 мм и внутренним 12 мм. Рабочая частота излучателя 1,15 мГц, максимальная амплитуда давления, полученная на его поверхности, ~26 атм. Излучатель укреплен при помощи замазки из воска с канифолью на коаксиальном держателе 2, к которому припаян провод 3 от внешнего электрода излучателя. Внутренний электрод 4 проложен внутри держателя, который смонтирован на коаксиальном патроне 5.

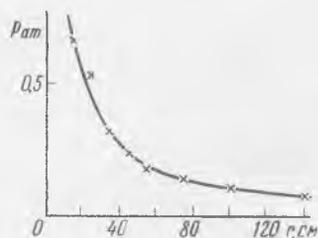
Экспериментальное исследование поля излучателя показало наличие сферического закона спада амплитуды давления в синусоидальной волне. На фиг. 3 сплошная кривая представляет функцию $p = p_0/r$, где p_0 — амплитуда давления на поверхности излучателя, r — расстояние от излучателя; крестиками обозначены значения амплитуды давления в волне, измеренные экспериментально на разных расстояниях от излучателя.

При экспериментах нами использовались миниатюрные широкополосные пьезоэлектрические приемники ультразвука [1] и приемники с чувствительным элементом в виде тонкой пластинки из керамического титаната бария. Конструкция приемника последнего вида представлена на фиг. 4. Тонкая пластинка из титаната бария 1 приклеивается по торцу к держателю из плексигласа 2, имеющему внутренний канал 3, заполненный водой. Второе отверстие канала заклеивается нейлоновой пленкой 4 толщиной 0,05 мм. Один электрод пластинки проволочкой 5, проходящей в стеклянной трубке 6 диаметром 6 мм, соединяется с центральным выводом коаксиального патрона 7, ввинчивающегося в корпус первого согласующего катодного повторителя. Наружная поверхность стеклянной трубки металлизирована. Ее металлическое покрытие соединяется с другим электродом пластинки и с патроном. Нами использовались пластинки из титаната бария различной формы: круглые диаметром 10 мм и квадратные со стороной 10 мм. Толщина пластинок 0,22—0,35 мм.

Калибровка приемников производилась методом сравнения с калиброванным приемником на частоте 1,15 мГц. Точность калибровки ~20%. Чувствительность приемников с элементом в виде пластинки толщиной



Фиг. 2



Фиг. 3

0,3 мм ~ 0,2 мкс/бар. Частотная характеристика приемников определялась по степени искажения спектрального состава пилообразной плоской волны.

Как известно ([2—4]), плоская волна большой амплитуды и синусоидальной формы вблизи излучателя становится пилообразной на расстоянии, определяемом выражением

$$L = \frac{\lambda \rho_0 c_0^3}{(K + 1) \pi P_0},$$

где λ — длина волны в воде, ρ_0 — плотность воды, c_0 — скорость звука в воде, $K = 7,15$ для воды, P_0 — амплитуда давления в волне. Это рас-



Фиг. 4

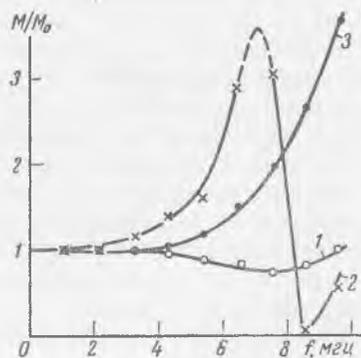
стояние принято называть расстоянием стабилизации волны. В таблице приведено сопоставление экспериментально полученного спектра пилообразной волны при частоте 1,05 мГц со спектром идеальной пилы.

Таблица

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

Содержание гармоник приведено по отношению к амплитуде на основной частоте.

Фотография формы реальной пилообразной волны была получена при использовании широкополосного миниатюрного пьезоэлектрического приемника ультразвука с размером чувствительного элемента ~ 0,12 мм. Таким образом, сфотографировав с экрана осциллографа изображение заведомо пилообразной волны, принятой приемником с неизвестной частотной характеристикой и проанализировав ее спектральный состав, можно достаточно точно определить частотную характеристику приемника сразу в очень широком диапазоне частот (охватывающем 6—8 гармоник основной частоты). Практически в водопроводной воде на частоте 1 мГц при диаметре плоского излучателя 3 см и интенсивности излучения 30 вт/см² (амплитуда давления ~ 10 атм) волна принимает пилообразную форму уже на расстоянии ~ 10 см от излучателя. Необходимо только учитывать, что расстояние стабилизации должно быть не больше ближней зоны плоского излучателя, так как приве-

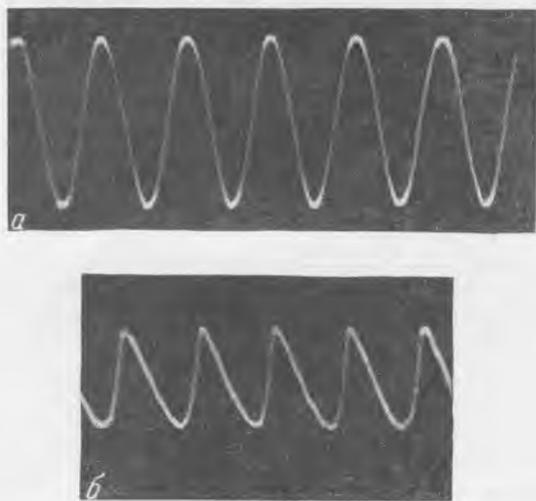


Фиг. 5

денное выше выражение для расстояния стабилизации справедливо для плоской волны.

На фиг. 5 представлены частотные характеристики применявшихся приемников, найденные указанным выше способом. Кривые 1, 2, 3 представляют частотные характеристики, соответственно, миниатюрного приемника, приемника с чувствительным элементом в виде пластинки диаметром 10 мм и толщиной 0,35 мм, приемника с чувствительным элементом в виде пластинки диаметром 10 мм и толщиной 0,22 мм.

В сферически расходящейся волне конечной амплитуды нелинейные эффекты развиваются значительно медленнее, чем в плоской волне. По-



Фиг. 6, а, б

этому, чтобы проследить рост гармоник в сферически расходящейся волне конечной амплитуды, приходится производить фотографирование формы волны на значительных расстояниях от излучателя. В описываемом эксперименте фотографирование формы волны производилось на расстоянии до 167 см от излучателя. Но на таком расстоянии амплитуда волны становится очень малой, и для уверенного приема сигнала необходим приемник с хорошей чувствительностью. С этой целью и были применены приемники с чувствительным элементом в виде пластинки из титаната бария. На малых расстояниях от излучателя, где амплитуда давления в волне достаточно велика, использовались миниатюрные приемники, так как приемники с плоским чувствительным элементом вносят большую погрешность при приеме сферической волны большой кривизны. Измерения проводились для двух значений амплитуды давления у поверхности излучателя: 14,2 атм и 26 атм на частоте 1,15 мегц. Перед каждым фотографированием координатным устройством тщательно юстировался приемник в поле излучателя по максимуму принимаемого сигнала. Фотографии формы сигнала подвергались гармоническому анализу с помощью анализатора Мадера, и по данным анализа строились графики зависимости процентного содержания гармоник от $\ln r/r_0$, где r — расстояние от излучателя, r_0 — радиус сферы. В нашем случае $r_0 = 0,8$ см.

На фиг. 6, а и б представлены фотографии формы волны на расстоянии 2 см и 167 см от излучателя. Амплитуда давления у поверхности излучателя в этом случае 26 атм.

На фиг. 7, а и б построена зависимость процентного содержания, соответственно, второй и третьей гармоник по сравнению с основной частотой от $\ln r/r_0$. Результаты эксперимента нанесены в виде треугольни-

ков и крестиков. Сплошные линии представляют теоретические зависимости, причем линии 1 построены для амплитуды давления у поверхности излучателя 14,2 атм, а линии 2 — для давления 26 атм. Теоретические зависимости процентного содержания гармоник в волне от расстояния до излучателя построены по результатам [5]:

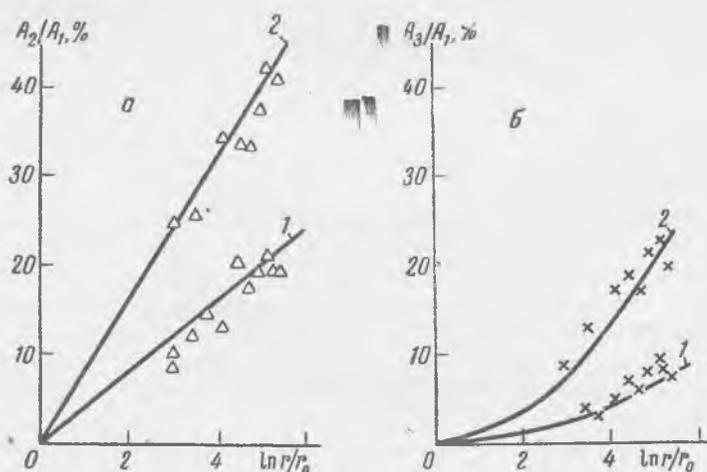
$$\text{для второй гармоники } \frac{A_2}{A_1} = \frac{1}{2} \frac{P_0}{\rho_0 c_0^2} \alpha \cdot k r_0 \ln \frac{r}{r_0} \cdot 100\%,$$

$$\text{для третьей гармоники } \frac{A_3}{A_1} = \left(\frac{1}{2} \frac{P_0}{\rho_0 c_0^2} \alpha \cdot k r_0 \ln \frac{r}{r_0} \right)^2 \cdot 100\%,$$

где P_0 — амплитуда давления в волне у поверхности излучателя, ρ_0 — плотность воды, c_0 — скорость звука в воде

$$\alpha = \frac{|K+1|}{2},$$

где $K = 7,15$ для воды, k — волновое число, r_0 — радиус сферы, r — расстояние от излучателя.



Фиг. 7, а, б

На основании экспериментальных результатов можно сделать вывод, что не только в плоской, но и в сферически расходящейся волне при достаточно больших амплитудах давления нелинейные эффекты могут привести к очень сильному искажению формы волны. Это в свою очередь повлечет за собой рост поглощения волны [4].

Выражаю благодарность Н. Н. Андрееву и Н. А. Рою за участие в обсуждении результатов, А. А. Ананьевой за любезно предоставленную в распоряжение автора сферу из титаната бария, Ю. М. Московенко и А. С. Гольневу за помощь в проведении эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. В. Романенко. Миниатюрные пьезоэлектрические приемники ультразвука. Акуст. ж., 1957, 3, 4, 342—347.
2. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М., ГИТТЛ, 1954, § 95.
3. З. А. Гольдберг. О распространении плоских волн конечной амплитуды. Акуст. ж., 1957, 3, 4, 322—328.
4. К. А. Наугольных, Е. В. Романенко. К вопросу о распространении волн конечной амплитуды в жидкости. Акуст. ж., 1958, 4, 2, 200—202.
5. К. А. Наугольных. Распространение сферических звуковых волн конечной амплитуды в вязкой теплопроводящей среде. Акуст. ж., 1959, 5, 1, 80—84.