АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том VI 1960 Вып. 1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В ВОДЕ

Е. В. Романенко

Экспериментально исследована зависимость скорости акустических потоков в воде, обусловленных волнами конечной амплитуды, от амплитуды давления и формы волны. Зависимость носит квадратичный характер, когда формы волны синусоидальная или пилообразная. При переходе синусоидальной формы волны в пилообразную наблюдается аномалия роста скорости акустических потоков при росте амплитуды волны.

В ряде работ, например [1, 2], исследуются закономерности, которым подчиняются акустические потоки, обусловленные волнами малой амплитуды. Что же касается акустических потоков от волн конечной амплитуды, когда существенны искажения формы волны, то автору известна лишь одна теоретическая работа [3].

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования акустических потоков в воде, обусловленных волнами конечной амплитуды, когда на некотором расстоянии от излучателя волна синусоидальной формы вследствие нелинейных эффектов становится пилообразной.

Исследование потоков производилось при помощи следующей установки (фиг. 1). В ванне *1*, наполненной водопроводной водой, устанавливались излучатель *2* и экран *3*. Односторонний излучатель был выполнен в виде круглой пластинки из керамики титаната бария диаметром 3 *см* и обладал рабочей частотой 1,2 *мгц*. Экран представлял собой жесткую рамку, затянутую звукопрозрачной пленкой, и находился на расстоянии 17 *см* от излучателя. Он предназначался для того, чтобы выделить тот участок ультразвукового луча, в котором акустический поток обусловлен только пилообразной волной.

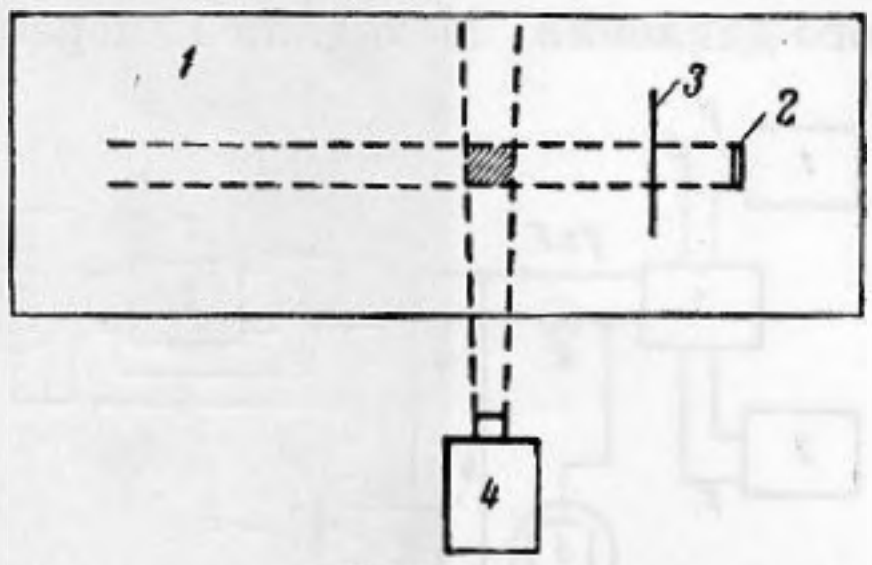
Ультразвуковой луч освещался при помощи кинопроектора *4* сквозь плексигласовую стенку ванны. Освещенный участок ультразвукового луча (заштрихованная часть) фотографировался сверху сквозь слой воды.

С целью визуализации потока использовались опилки алюминие-магниевого сплава (электрон) и порошок силита, имеющий мелкокристаллическую структуру. Ввиду того, что освещение прерывистое (частота кадров 1—10 *гц*), освещенные частицы прочерчивают в потоке штрихи, по которым легко определить скорость потока. Пример фотографии потока приведен на фиг. 2 (излучатель находится слева). На снимке видно, что подтекание жидкости в поток происходит в каждой точке боковой границы потока.

Измерение скорости потока осуществлено для двух режимов работы излучателя: непрерывного и импульсного. В последнем случае импульсы длительностью 3 *мсек* и частотой заполнения 1,2 *мгц* излучались с частотой повторения 50 *гц*. Измерения начинались при такой интенсивности, когда за экраном уже распространялась пилообразная волна. Максимальная скорость потока при данной интенсивности определялась по максимальной длине штриха, прочерченного в потоке освещенной частицей, и по известной длительности освещения.

На фиг. 3 представлены результаты измерений. По оси абсцисс отложена интенсивность волны у экрана, по оси ординат — скорость акустического потока на расстоянии 20 *см* от экрана. Каждая точка отвечает сред-

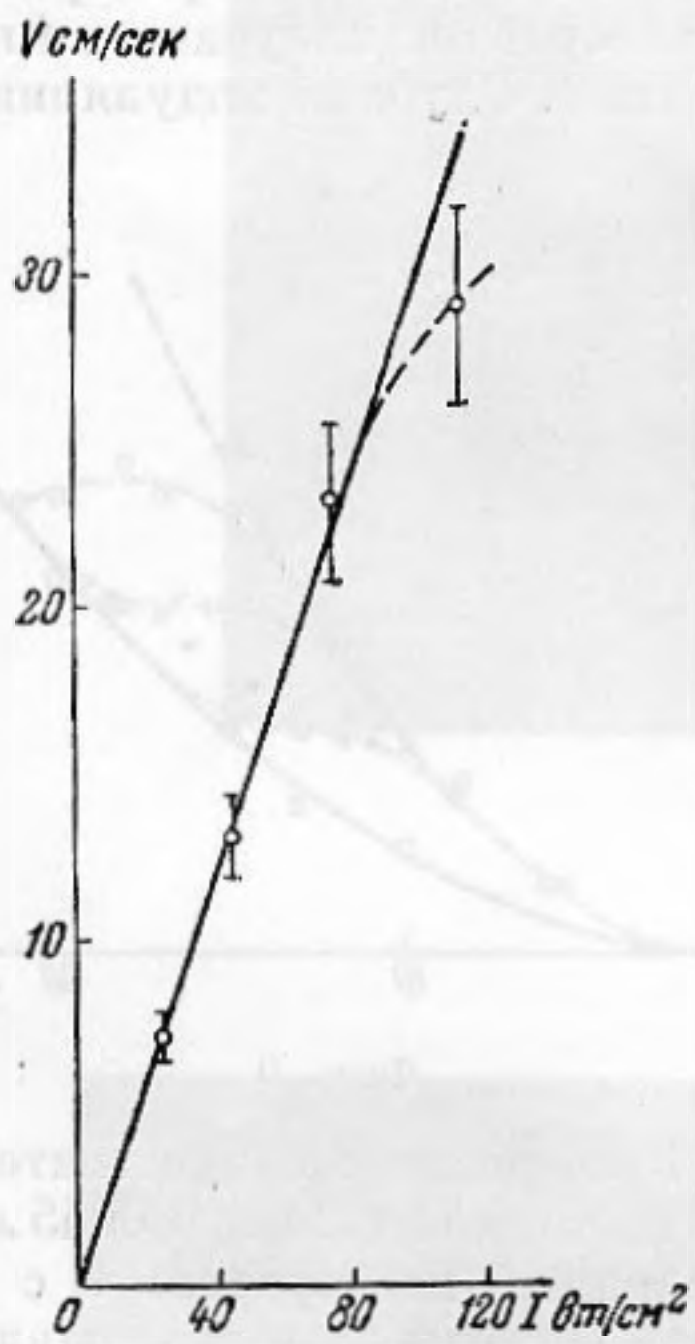
нему из 8—10 измерений при погрешности эксперимента не больше 15—20%. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что скорость потока находится в линейной зависимости от интенсивности волн пилообразной формы. Экспериментально установлено, что характер зависимости не меняется при изменении частоты повторения импульсов. Отклонение точек от прямой линии при больших значениях интенсивности можно объяснить поглощением волны на пути от экрана до точки измерения.



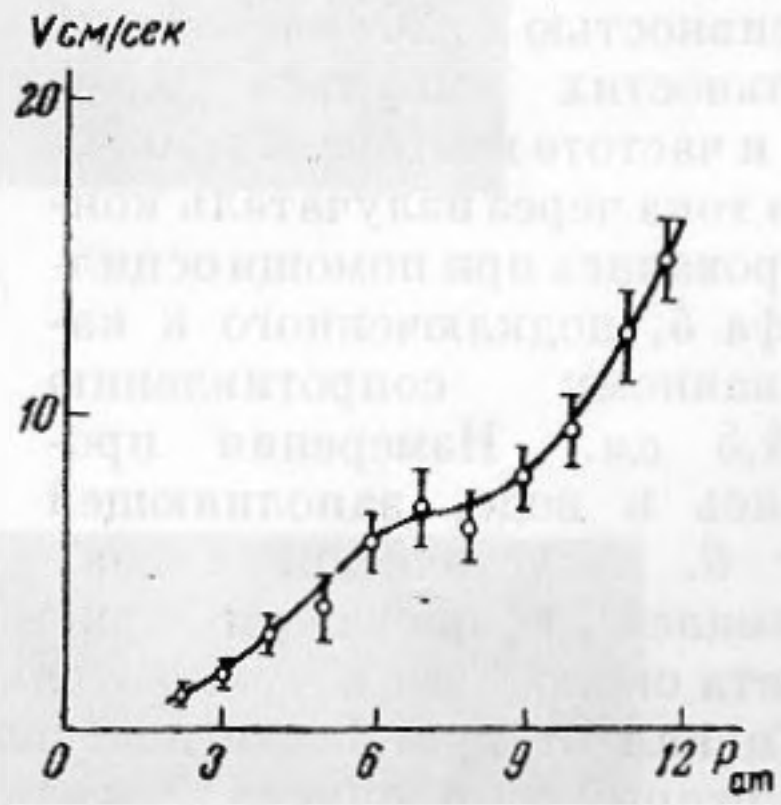
Фиг. 1

В непрерывном режиме измерения проводились без экрана. В этом случае скорость потока измерялась при последовательном переходе формы волны от синусоидальной к пилообразной на участке между излучателем и точкой измерения. Форма волны контролировалась при помощи миниатюрного приемника [4]. На фиг. 4 представлены результаты измерений на частоте 1,2 *мгц*.

По оси абсцисс отложена амплитуда давления у поверхности излучателя, по оси ординат — скорость потока на расстоянии 40 *см* от излучателя. Каждая точка есть среднее 8—10 измерений. На усредняющей сплошной кривой отчетливо заметен участок перегиба, причем начало перегиба соответствует тому значению амплитуды давления у поверхности излучателя, при котором в точке измерения форма волны меняется от синусоидальной к пилообразной. До и после перегиба скорость потока изменяется квадратично с давлением (т. е. линейно с интенсивностью, как в импульсном режиме).



Фиг. 3

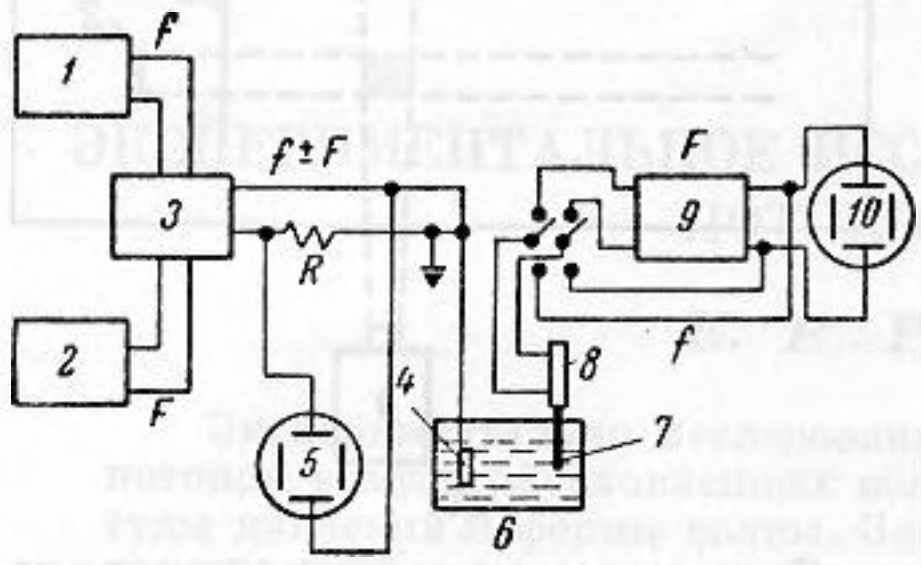


Фиг. 4

Аналогичные измерения, проведенные на частоте 1,88 *мгц*, привели к аналогичному результату. Гидродинамическое число Рейнольдса для участка перегиба составляет около 100, что на порядок ниже, чем критическое значение, при котором возникает турбулентность. На фиг. 5 приведена фотография потока в режиме, отвечающем области перегиба. Характер штрихов свидетельствует о ламинарном течении.

Эти факты дают основание считать, что аномалия роста скорости потока с ростом амплитуды волны определяется не турбулентностью потока, что можно было бы предположить, а изменением формы волны от синусоидальной к пилообразной.

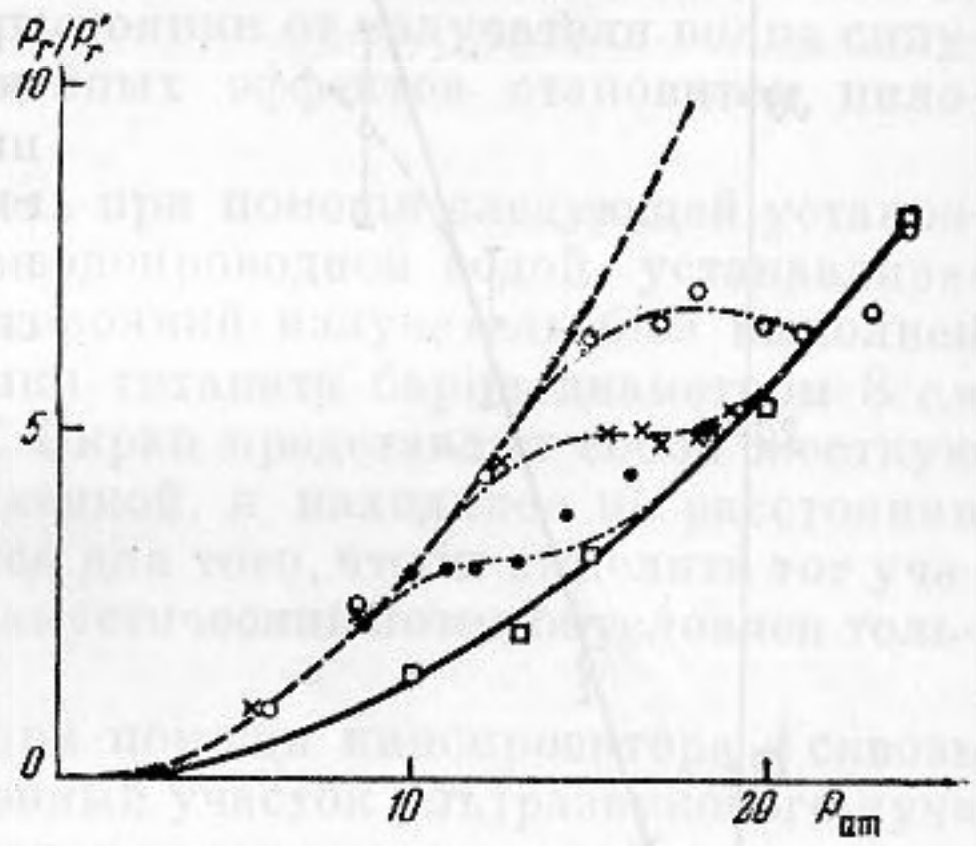
Этот вывод подтверждается так же исследованием зависимости радиационного давления от амплитуды давления и формы волны. Дело в том, что акустические потоки обусловлены радиационным давлением [5, 6] и, следовательно, аномалия роста скорости потока с ростом амплитуды давления может быть объяснена соответствующей аномалией роста радиационного давления. Методика измерений аналогична описанной в [7].



Фиг. 8

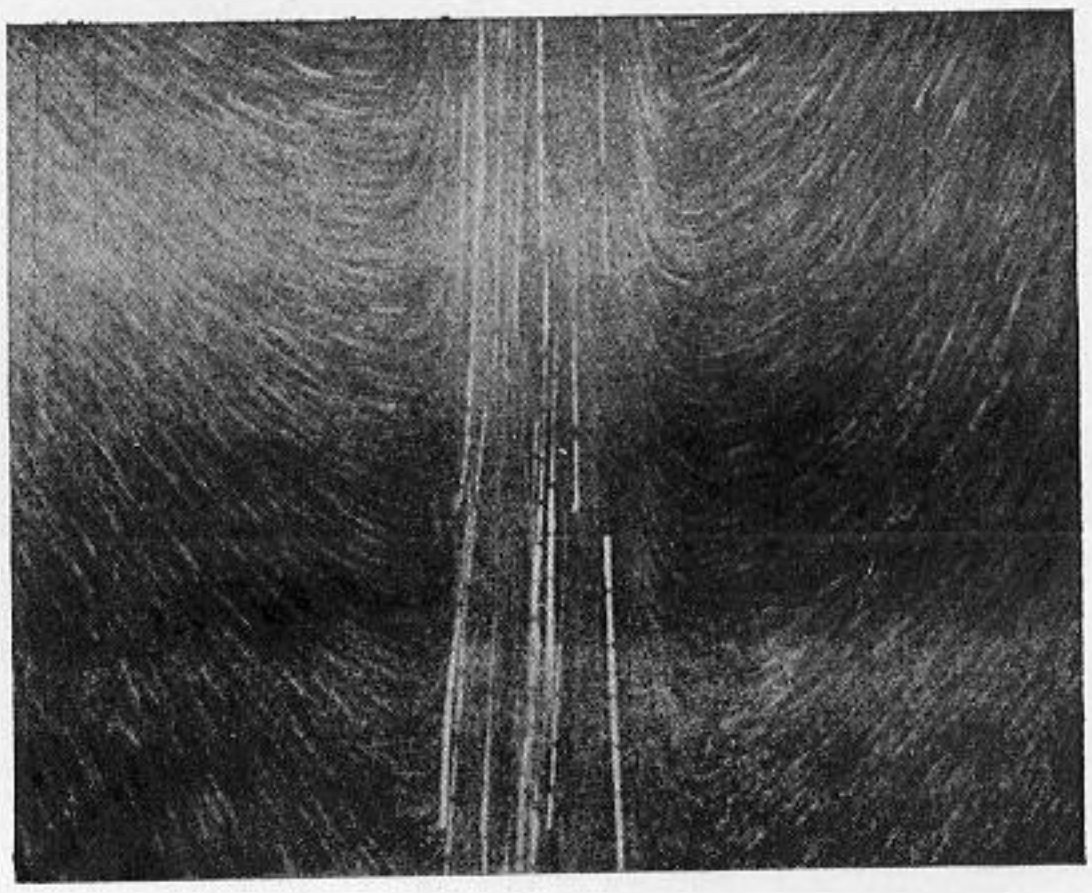
Акустические сигналы излучались в воду в виде высокочастотных импульсов с низкочастотной модуляцией, форма которых представлена на фиг. 6. Частоты несущей и модуляции соответственно f и F. Миниатюрный акустический приемник принимает как высокочастотное давление, так и переменную часть радиационного давления, меняющуюся с частотой модуляции. Приемная аппаратура выделяет только переменную часть радиационного давления и на экране осциллографа наблюдается импульс, аналогичный изображенному на фиг. 7.

Блок-схема установки представлена на фиг. 8. Напряжения частоты $f = 1{,}2$ *мгц* и $F = 40$ *кгц* подаются соответственно от генераторов *1* и *2* на смеситель усилителя-модулятора *3*, от которого на излучатель *4* подается напряжение в форме, показанной на фиг. 6. Глубина модуляции 20%. Излучателем служит пластина из керамического титаната бария диаметром 3 *см* и толщиной 0,2 *см*. Режим излучения односторонний, импульсный. Излучатель, питаемый от усилителя-модулятора, мог излучать ультразвук в воду интенсивностью до 200 *вт/см*^{2} при длительностях импульса 0,5—1 *мсек* и частоте повторения 10 *гц*. Форма тока через излучатель контролировалась при помощи осциллографа *5*, подключенного к калиброванному сопротивлению $R = 4{,}5$ *ом*. Измерения проводились в воде, заполняющей ванну *6*. Акустический сигнал принимался сферическим приемником *7* с размером чувствительного элемента около 1 *мм* и чувствительностью на частоте 1,2 *мгц* 0,0045 *мкв/бар* [8]. Сигнал от приемника поступал в катодный повторитель *8* с фильтром, который не пропускал сигнал высокой частоты даже к управляющей сетке катодного повторителя. От катодного повторителя сигнал, обусловленный переменной частью радиационного давления, через избирательный усилитель *9* поступает на экран осциллографа *10*.

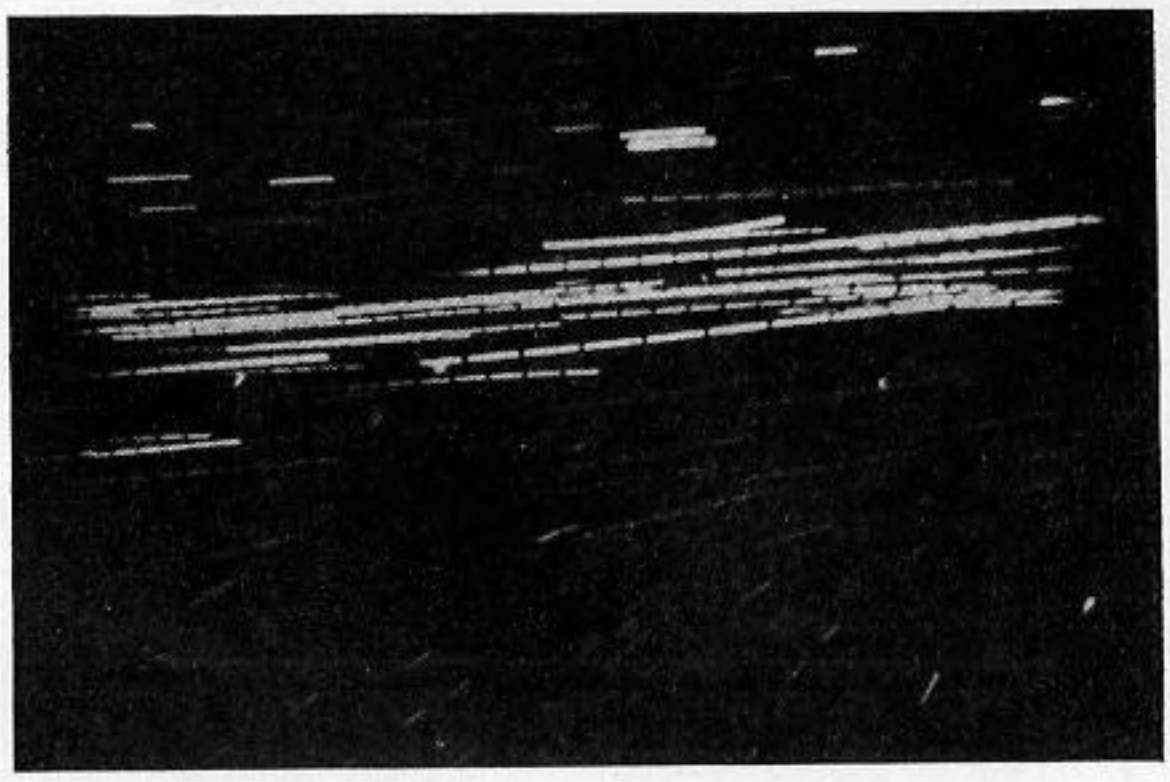


Фиг. 9

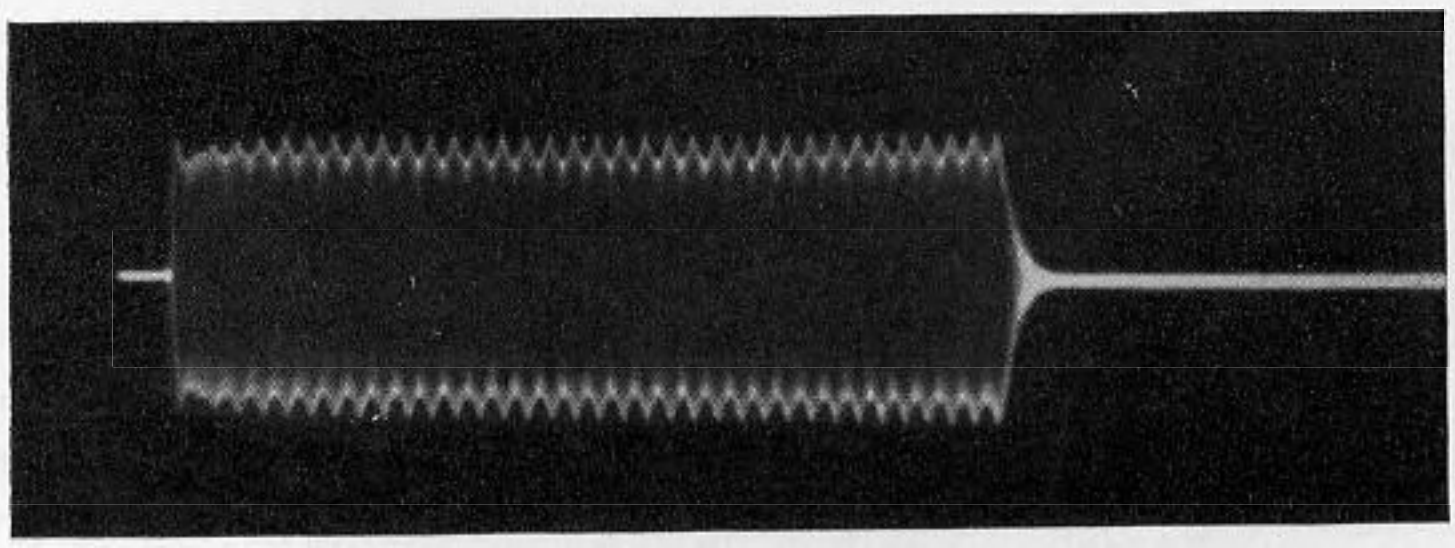
Результаты измерения представлены на фиг. 9. По оси абсцисс отложена амплитуда давления в волне, по оси ординат — величина, пропорциональная переменной части радиационного давления. Экспериментальные результаты в виде точек, крестиков и кружков с усредняющими их штрихпунктирными линиями представляют собой зависимость переменной части радиационного давления от амплитуды давления в волне на расстояниях от излучателя соответственно 30, 20 и 15 *см*. Пунктирная линия представляет собой параболу, проведенную через экспериментальные точки, соответствующие минимальной амплитуде рабочего диапазона давлений,



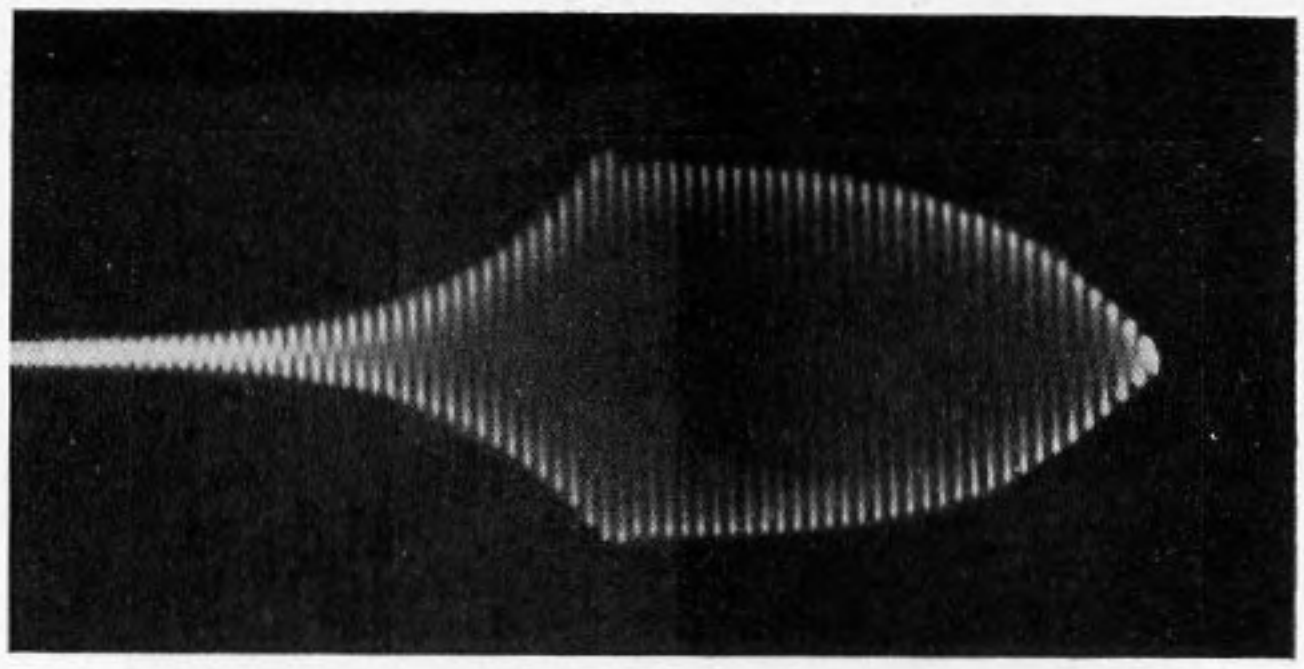
Фиг. 2



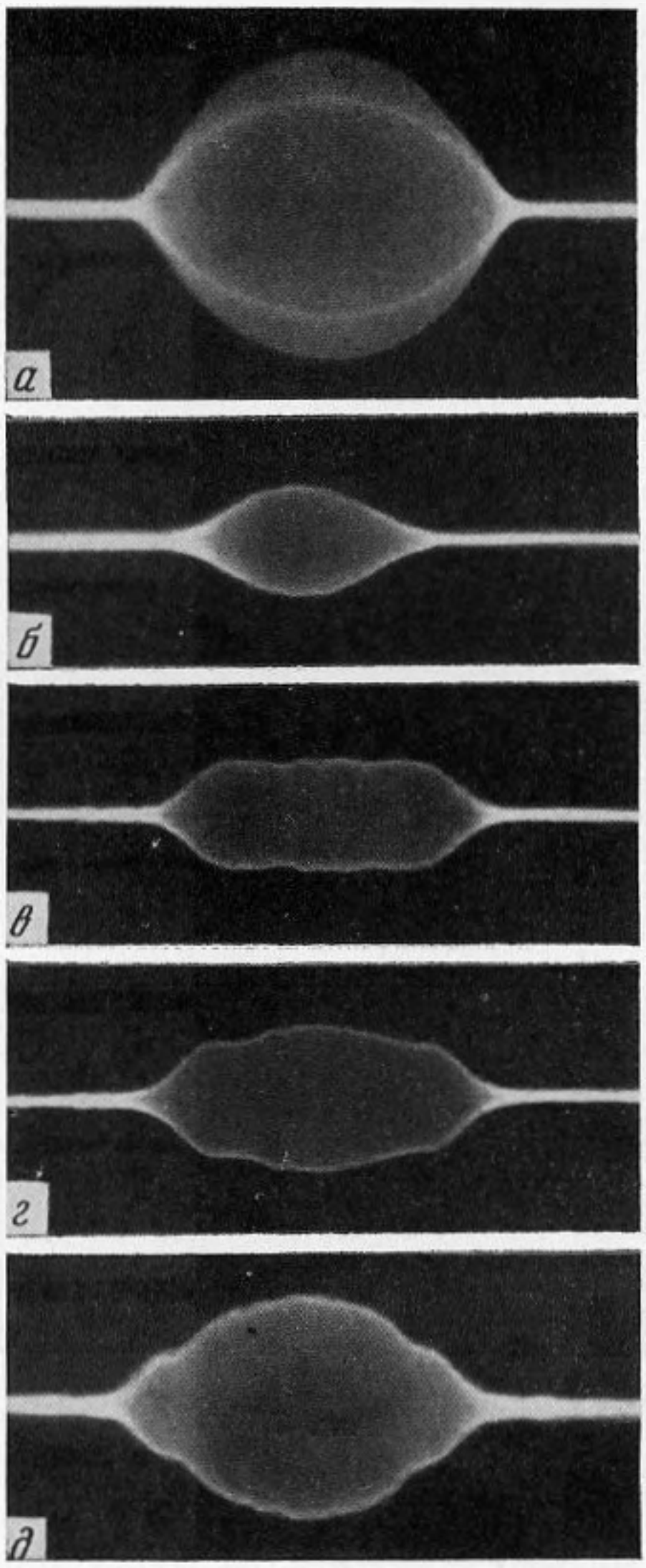
Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 10

когда форма волны в точке измерения синусоидальна, сплошная линия — параболу, проведенную через экспериментальные точки, соответствующие максимальной амплитуде рабочего диапазона давлений, когда форма волны пилообразная. Квадратиками обозначена зависимость радиационного давления от амплитуды волны, имеющей пилообразную форму.

Таким образом, амплитуда переменной части радиационного давления находится в квадратичной зависимости от амплитуды высокочастотного звукового давления не только для синусоидальной (пунктирная линия), но и для пилообразной (сплошная линия) формы волны. В области изменения синусоидальной формы волны в пилообразную наблюдается переход экспериментальных точек с одной параболы на другую, т. е. зависимость радиационного давления от амплитуды высокочастотного давления имеет тот же характер, что и зависимость скорости потока от амплитуды давления, хотя о турбулентности в данном случае не могло быть и речи.

Аномалия роста радиационного давления с увеличением амплитуды звука в области перехода синусоидальной волны в пилообразную наглядно демонстрируется следующим экспериментом. Если излучатель посылает в среду модулированные импульсы длительностью около 6*мсек*, форма которых показана на фиг. 10, *а*, то импульс переменной части радиационного давления, принятый миниатюрным приемником, будет иметь вид, показанный на фиг. 10, *б*. Такая форма импульса радиационного давления будет до тех пор, пока в импульсе 10, *а* волна остается синусоидальной. Как только амплитуда давления в звуковом импульсе возрастает до величины, когда синусоидальная форма в центральной части импульса начинает переходить в пилообразную, рост радиационного давления замедляется и форма импульса радиационного давления принимает вид, показанный на фиг. 10,*в*. При дальнейшем росте амплитуды давления в звуковом импульсе появляется область с пилообразной формой волны, в результате чего форма импульса радиационного давления принимает вид, представленный на фиг. 10,*г* и 10,*д*.

Анализ результатов, представленных на фиг. 3, 4, 9, свидетельствует о том, что скорость акустических потоков находится в квадратичной зависимости от амплитуды давления в волне, имеющей пилообразную форму. Результаты работы [3] свидетельствуют о несколько более крутой зависимости, чем квадратичная. Но условия эксперимента значительно отличаются от условий, положенных в основу расчета в работе [3], поэтому ожидать совпадения результатов, по-видимому, нет оснований.

Выражаю благодарность Н. Н. Андрееву, В. А. Красильникову, Н. А. Рою за ряд ценных советов, а также Ю. М. Московенко и А. С. Гольневу за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. N. Libermann. Second viscosity of liquids. Phys. Rev., 1949, 75, 9, 1415—1422.
2. Johnson, Tjötta. Eine theoretische und experimentalle Untersuchung über den Quarzwind. Acustica, 1957, 7, 1, 7—16.
3. К. А. Наугольных. К вопросу о потоках, вызванных звуком. Докл. АН СССР, 1958, 123, 6, 1003—1006.
4. Е. В. Романенко. Миниатюрные пьезоэлектрические приемники ультразвука. Акуст. ж., 1957, 3, 4, 342—347.
5. F. E. Fox, K. F. Herzfeld. On the forces producing the ultrasonic wind. Phys. Rev., 1950, 78, 2, 156—157.
6. F. E. Bergnis. Acoustic radiation pressure of plane compressional waves. Rev. Modern Phys., 1953, 25, 3, 653—664.
7. F. L. McNamare, R. T. Bayer. A variation of the radiation pressure method of mesuring lounds absorption ib liquids. J. Acoust. Soc. America, 1953, 25, 2, 259—262.
8 Н. А. Рой, Е. В. Романенко. Широкополосные ультразвуковые приемники. Передовой научно-технический и производственный опыт. Тема 38, № П-58 169/6.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
27 июня 1959 г.