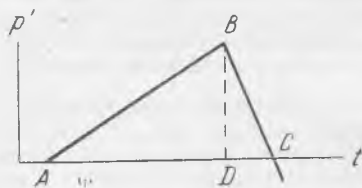


10 декабря 1957 г.

К ВОПРОСУ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛН КОНЕЧНОЙ АМПЛИТУДЫ В ЖИДКОСТИ

К. А. Наугольных, Е. В. Романенко

В последнее время появилось несколько работ [1, 2, 3, 4, 5], которые указали на рост коэффициента поглощения звуковой волны в жидкости с увеличением ее интенсивности. Это явление обусловлено искажением формы волны вследствие нелинейных эффектов, которые становятся заметными, начиная с $Re \sim 1$ и выше, где $Re = \frac{P'}{2\pi \nu b}$, P' — амплитуда давления, ν — частота, $b = (4/3)\eta + \zeta$; η, ζ — коэффициенты вязкости. В настоящей работе, относящейся к области $Re > 1$, проводится приближенный расчет поглощения расходящейся волны и



Фиг. 1

его результаты сравниваются с экспериментом. Опыт показал, что форму волны на некотором расстоянии от излучателя можно представить схемой на фиг. 1. Существенно, что при распространении волны в области, где производились измерения, отрезок AC и крутизна переднего фронта практически не меняются, уменьшается лишь амплитуда BD . Это дает основание применить для расчета изменения амплитуды с расстоянием схему, приведенную, например, в [6, § 95], с учетом расхождения волны по закону

$P'/P_0 = (r_0/rt)^a$, где $a = \text{const}$. Можно показать, что вычисленное таким образом поглощение волны вызывается, в конечном счете, вязкостью и теплопроводностью среды. Расчет дает:

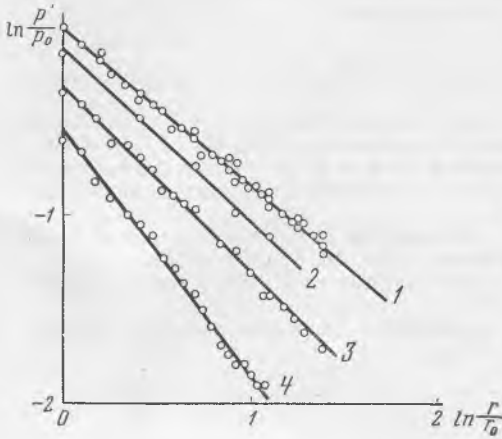
$$P' = \frac{P_0}{1 + \frac{(k+1)P_0'v_0^a}{\rho_0 v_0^3(1-a)}(r^{1-a} - r_0^{1-a})} \left(\frac{r_0}{r}\right)^a, \quad (1)$$

где ρ_0 — равновесная плотность, c_0 — скорость звука, p' — амплитуда давления в точке r , k — показатель степени в уравнении состояния, равный для газов отношению теплоемкостей; для воды $k = 7,15$.

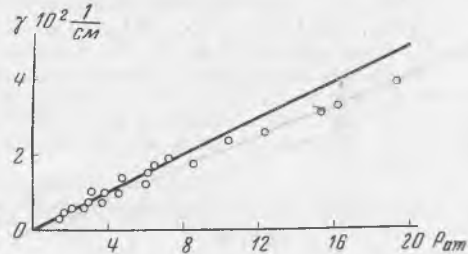
Из (1) мы получаем коэффициент затухания в точке r_0 , где амплитуда волны p'_0

$$\ln \frac{p'}{p'_0} = -\frac{1}{p'} \frac{dp'}{dr} = -\frac{a}{r_0} + \frac{(k+1)p'_0 v}{\rho_0 c_0^3}. \quad (2)$$

Первый член в правой части (2) характеризует уменьшение амплитуды давления вследствие расхождения волны, второй член — вследствие поглощения. Полу-



Фиг. 2

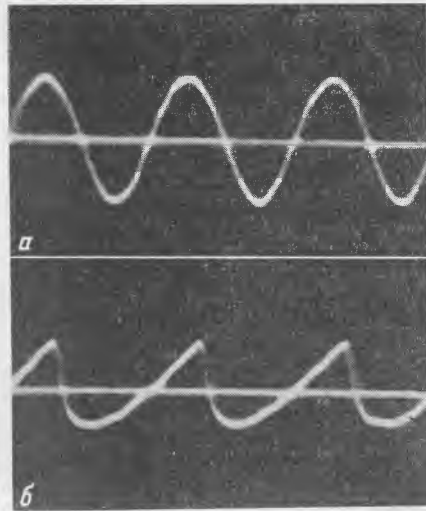


Фиг. 4

ченная в работах [2, 3, 4, 5] линейная зависимость γ/v^2 от давления и обратная пропорциональность γ/v^2 частоте качественно согласуется с выражением (2).

Измерения проводились в водопроводной воде в импульсном режиме с частотой повторения импульсов 50 гц, длительностью импульсов 20—40 мксек и частотой заполнения 1 мсц. Импульсный режим позволил достигнуть пиковой интенсивности до 300 вт/см². Излучателем служила пластинка из керамического титаната бария диаметром 2 см и толщиной 0,2 см. В качестве приемника использовался миниатюрный пьезоэлектрический приемник с размером чувствительного элемента 0,015 см, чувствительностью 0,001 мкс/бар и с полосой принимаемых частот до 10 мсц при неравномерности к концу диапазона около 30%, откалиброванный с точностью до 20%, а также кварцевая пластинка толщиной 0,02 см и диаметром 4 см. Приемная радиоаппаратура имела полосу пропускания до 10 мсц и линейную фазовую характеристику в этом диапазоне. Измерения производились на расстоянии от 10 до 40 см от излучателя в диапазоне амплитуд давления на расстоянии 10 см от излучателя от 0,05 до 30 ат. Расхождение волны определялось при амплитуде давления 0,05 ат, когда нелинейные эффекты несущественны. Для этого был построен график зависимости $\ln p'/p'_0$ от $\ln r/r_0$ (фиг. 2). Точки с большой точностью укладываются на прямую 1, наклон которой дает значение параметра a для данного излучателя и данной частоты. При интенсивности на излучателе порядка десятков вт/см² сигнал, практически синусоидальный у излучателя (фиг. 3, а), принимает на некотором расстоянии от излучателя пилообразную форму, несимметричную относительно оси $p' = 0$. На расстоянии 80 см от излучателя, например, волна имеет форму, изображенную на фиг. 3, б. Для определения поглощения волны измерялось уменьшение амплитуды полупериода сжатия с расстоянием, полученный по этим измерениям коэффициент поглощения равен половине коэффициента поглощения по энергии.

На фиг. 2 представлены полученные зависимости $\ln p'/p'_0$ от $\ln r/r_0$ для давлений $p'_0 = 3,1$ ат (2, 2), 7, 8 ат (2, 3), 21,4 ат (2, 4) на расстоянии $r_0 = 10$ см от излучателя. Графики 2, 3, 4 сдвинуты относительно 1 по оси ординат, чтобы избежать наложения экспериментальных точек. Экспериментальные точки хорошо укладываются на прямые, наклон которых, в пределах ошибки измерения, совпадает с вычисленным по формуле 2.



Фиг. 3

На фиг. 4 представлена теоретическая зависимость γ от p' и экспериментальные результаты.*

В заключение мы выражаем благодарность Н. Н. Андрееву и Н. А. Рою за ряд ценных советов и участие в обсуждении результатов; А. С. Гольневу и Ю. М. Москоченко за помощь в проведении эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. A. Fox, W. A. Wallace. The absorption of finite amplitude sound waves. J. Acoust. Soc. America, 1954, 26, 1, 147—153.
2. D. M. Towle, R. B. Lindsay. Absorption and velocity of ultrasonic waves of finite amplitude in liquids. J. Acoust. Soc. America, 1955, 27, 3, 530—533.
3. Л. К. Зарембо, В. А. Красильников и В. В. Шкловская — Корди. О поглощении ультразвуковых волн конечной амплитуды в жидкостях. Докл. АН СССР, 1956, 109, 4, 731—734.
4. V. Narasimhan, R. T. Beyer. Attenuation of ultrasonic waves of finite amplitude in liquids. J. Acoust. Soc. America, 1956, 28, 6, 1233—1236.
5. R. T. Beyer, V. Narasimhan. Note on finite amplitude waves in liquids. J. Acoust. Soc., America, 1957, 29, 4, 532.
6. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М., ГИТТЛ, 1954. г.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступило в редакцию
10 декабря 1957 г.