АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XX 1974 Вып. 2

УДК 534.286

ИЗМЕРЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ЖИДКОСТЯХ НА ЧАСТОТАХ 50 *кгц* — 4 *мгц*

Ю. С. Манучаров, И. Г. Михайлов

Описан реверберационный метод измерения коэффициента поглощения ультразвуковых волн в жидкостях в диапазоне частот 50 *кгц* — 4 *мгц*. Для устранения вязкостных граничных потерь применены сосуды с акустически мягкими стенками. Выполнено измерение поглощения в хлопковом и льняном маслах в сосудах объемом 0,5 *л*. В обоих маслах обнаружена релаксация объемной вязкости. На частотах ниже 500 *кгц* величина α/ν^2 принимает постоянное значение.

В настоящее время измерение коэффициента поглощения ультразвуковых волн в жидкостях на частотах ниже 1—4 *мгц*, где увеличение ошибок из-за дифракции делает невозможным применение классического импульсного метода, обычно производится реверберационным методом [1]. Сущность метода состоит в следующем. В сосуде с жидкостью возбуждается звуковое поле, затем возбуждение снимается, и амплитуда колебаний A затухает по экспоненциальному закону: $A=A_0 \exp(-\beta t)$. В зависимости от характера звукового поля реверберационный метод делится на две разновидности: резонансно-реверберационный, при котором возбуждается единственная резонансная мода колебаний системы сосуд — жидкость, и метод статистической реверберации, при котором возбуждается диффузное звуковое поле.

Затухание звука в системе сосуд — жидкость определяется собственно поглощением в жидкости, которое нас и интересует ($\beta_0=\alpha_0 c_0$, где α_0 и c_0 — соответственно коэффициент поглощения и скорость звука в жидкости), а также «паразитными» потерями, которые определяются следующими процессами.

1. Поглощением звука в стенках сосуда

$$\beta_n=\frac{\gamma_n \alpha_1 c_1 \rho_1}{\left(1+\gamma_n \frac{d\rho}{\rho_0}\mu\right)\rho_0} d\mu, \tag{1}$$

где ρ — плотность, d — толщина стенок, μ — отношение поверхности сосуда к объему. Индекс 0 относится к жидкости, 1 — к стенкам сосуда.

2. Излучением звука в окружающую среду

$$\beta_{nz}=\frac{\gamma_n z(p)\mu}{\left(1+\gamma_n \frac{d\rho}{\rho_0}\mu\right)\rho_0}, \tag{2}$$

где $z(p)$ — удельное акустическое сопротивление среды при давлении p.

3. Затуханием звука, вызванным возникновением вязких волн в пограничном слое у стенок

$$\beta_t=\gamma_t\mu\frac{\sqrt{\pi\eta_s f/\rho_0}}{1+\gamma_n\frac{d\rho}{\rho_0}\mu}, \tag{3}$$

где η_s — динамическая сдвиговая вязкость на частоте f. Коэффициенты γ_n и γ_t определяют взаимодействие звукового поля в жидкости со стенками: $\gamma_n=(v_n/v)^2$, $\gamma_t=(v_t/v)^2$, где v — колебательная скорость частиц в жидкости, v_n и v_t — нормальная и тангенциальная составляющие скорости на границе.

4. Затуханием, обусловленным потерями в преобразователях, устройствах подвеса и т. д. Оно может быть сведено к минимуму выбором рациональной конструкции этих элементов.

Отсюда следует, что «паразитные» потери связаны в основном с условиями на границе жидкости. Практически все граничные потери пропорциональны отношению поверхности сосуда к объему, поэтому погрешность измерений увеличивается с уменьшением размеров сосуда. При расчете граничных потерь основную трудность представляет определение величин γ_n и γ_t. В случае диффузного поля они могут быть легко определены для предельных случаев абсолютно жесткой стенки, когда $\gamma_n=0$, $\gamma_t={}^2/_3$, и абсолютно мягкой стенки, когда $\gamma_n={}^1/_3$; $\gamma_t=0$ [1]. Расчет этих величин в реальном случае встречает большие трудности, так как вследствие нестационарного характера звукового поля в сосуде стенки последнего совершают дополнительные резонансные колебания. В резонансно-реверберационном методе при возбуждении чисто радиальных мод в сфере величина γ_t должна обращаться в нуль, но практически даже небольшая асимметрия сосуда приводит к появлению диффузной составляющей звукового поля. Поэтому граничные потери определяются экспериментально по данным измерений затухания в сосуде, заполненном эталонной жидкостью с известным поглощением [2, 3]. Как следует из выражений (1)—(3), эталонная и исследуемая жидкости должны иметь одинаковые акустические сопротивления и вязкости η_s. Последнее условие особенно трудновыполнимо, поэтому непосредственно в эксперименте необходимо стремиться уменьшить именно вязкостные потери.

В наших измерениях, основанных на методе статистической реверберации, вязкостные потери устраняются применением сосудов с акустически мягкими стенками. Первоначально для этой цели использовались сосуды из алюминиевой фольги толщиной 10 *мк*. Изверения γ_t по методике, предложенной Скучиком [1], дали значение $\gamma_t\leqslant 0{,}05$ в диапазоне частот 50—300 *кгц*. Однако общее затухание в этом случае намного превышает затухание в обычно применяемых алюминиевых сосудах со стенками толщиной 1 *мм*, а значения γ_n, вычисленные по формуле (2) по данным измерений зависимости $\beta_{nx}(p)$, намного превышают величину ${}^1/_3$. Например, на частоте 100 *кгц* получается значение $\gamma_n=30$, т. е. сосуд колеблется в $\sqrt{30}\approx 5{,}5$ раза сильнее, чем он должен был бы колебаться при полной акустической мягкости его стенок.

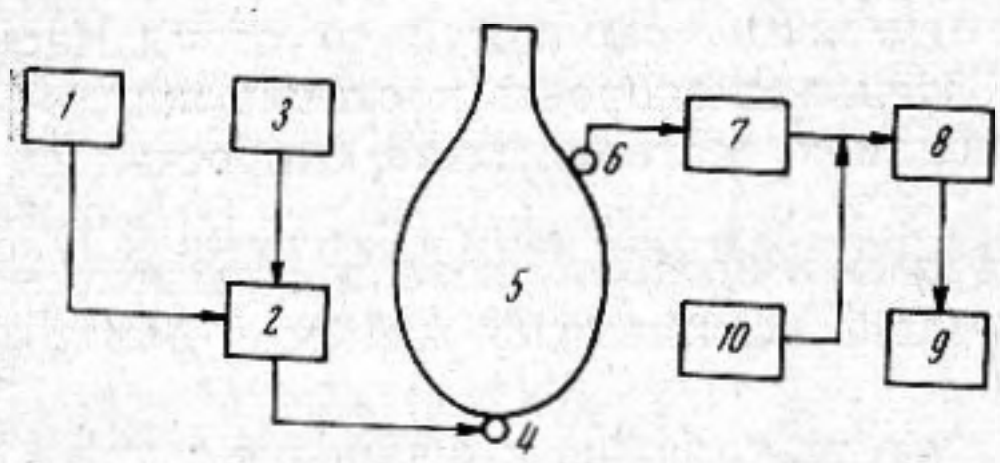
Это явление объясняется следующим образом. Если длина волны изгибных колебаний стенок меньше, чем длина волны в граничащей среде λ, то стенка колеблется в режиме акустического короткого замыкания и не излучает звука. Длина изгибной волны для тонкой пластины выражается формулой [1]

$$\lambda_p=\sqrt{\frac{2\pi}{f}\sqrt{g/\rho_1}},$$

где $g=d^2E/12(1-\sigma^2)$ — цилиндрическая жесткость пластинок. Здесь d — толщина пластины, E — модуль Юнга, σ — коэффициент Пуассона. В на-

шем случае $\lambda_p \ll \lambda$, поэтому колеблющиеся стенки не претерпевают затухания, обусловленного излучением в жидкость, и благодаря переходным процессам в жидкости совершают резонансные колебания. Амплитуда этих колебаний зависит от добротности стенок, которая в данном случае определяется в основном цилиндрической жесткостью.

Эти соображения привели нас к выводу, что целесообразно использовать сосуды из материалов с малым модулем Юнга (резина, полиэтилен), несмотря на то что коэффициент поглощения в них велик. Как показали наши измерения, в тонкостенных резиновых и полиэтиленовых сосудах вязкие потери малы и наблюдаемые потери почти целиком определяются поглощением в стенках сосудов и излучением в воздухе, причем $\gamma_n = 1/3$.



Фиг. 1

Измерения коэффициента поглощения в вязких жидкостях (растительных маслах) мы производили в резиновых сосудах со стенками толщиной 10 *мк* и объемом 0,5—0,7 *л*. В этих сосудах $\gamma_t \leqslant 10^{-2}$ для частот ниже 200 *кгц* и $\gamma_t \leqslant 2 \cdot 10^{-2}$ в диапазоне частот 200—500 *кгц*. При таких значениях γ_t можно пренебречь различием в вязкостях эталонной и исследуемой жидкостей.

Поглощение звука в стенках сосудов невелико ввиду их малого объема и одинаково для всех жидкостей, поэтому оно легко исключается. Потери на излучение частично устраняются помещением экспериментального сосуда в вакуумную камеру.

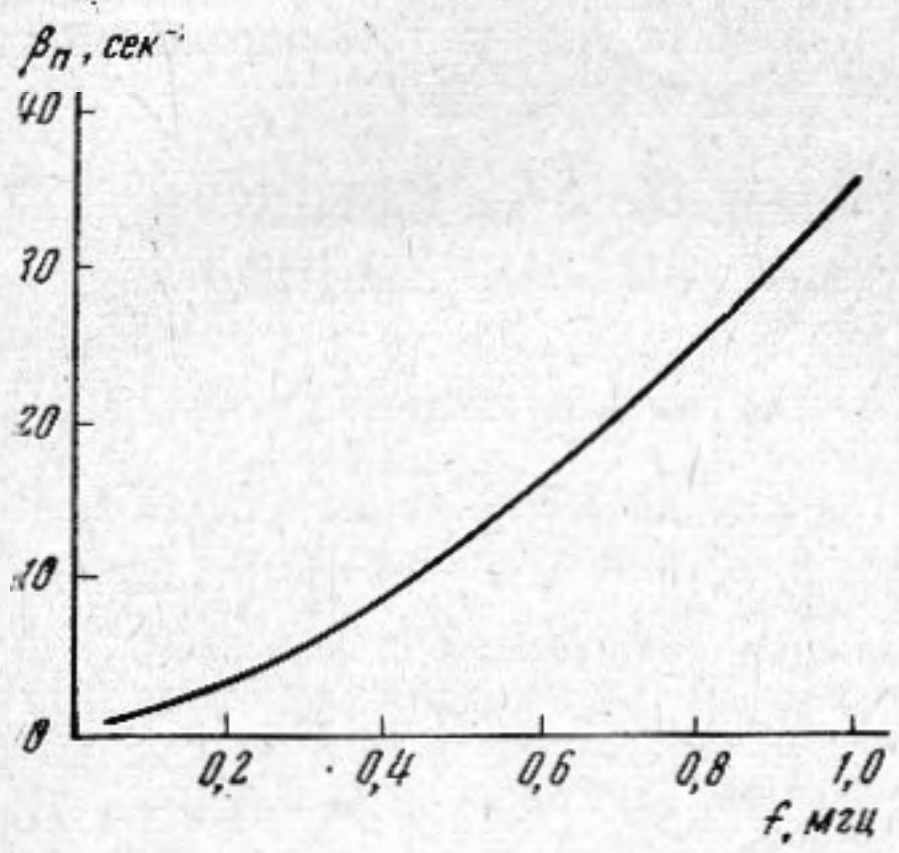
Экспериментальная схема показана на фиг. 1. Импульсный генератор *1* прямоугольным импульсом ($\tau = 2$ *мсек*) отпирает модулятор *2*, который на время длительности импульса пропускает сигнал от задающего генератора *3*. Радиоимпульс подается на излучатель *4*, возбуждающий в сосуде *5* звуковое поле. Экспоненциально спадающие ультразвуковые колебания преобразуются приемным датчиком *6* в электрический сигнал, который проходит через усилитель *7*, а затем через логарифматор *8* поступает на осциллограф *9*. На экране осциллографа наблюдается огибающая логарифмированного сигнала, представляющая собой прямую линию, наклон которой определяет декремент затухания β. Наклон линии измерялся путем совмещения с ней прямой, полученной логарифмированием калиброванного экспоненциального сигнала, вырабатываемого генератором *10*.

Для получения диффузного звукового поля использовались частотно-модулированные колебания, вырабатываемые задающим генератором качающейся частоты 1 с регулируемой девиацией. Обычно использовалась полоса частот 5 *кгц*, что достаточно для устранения интерференционных эффектов, в то время как погрешность, связанная с предположением, что частота измерений равна средней частоте полосы, мала по сравнению с другими погрешностями. В качестве излучателя и приемника применялись сферические преобразователи из титаната бария, касающиеся стенок сосудов через тонкий слой смазки (касторовое масло), причем, во избежание влияния датчиков на затухание, площадь соприкосновения не превышала 5 *мм*^{2}.

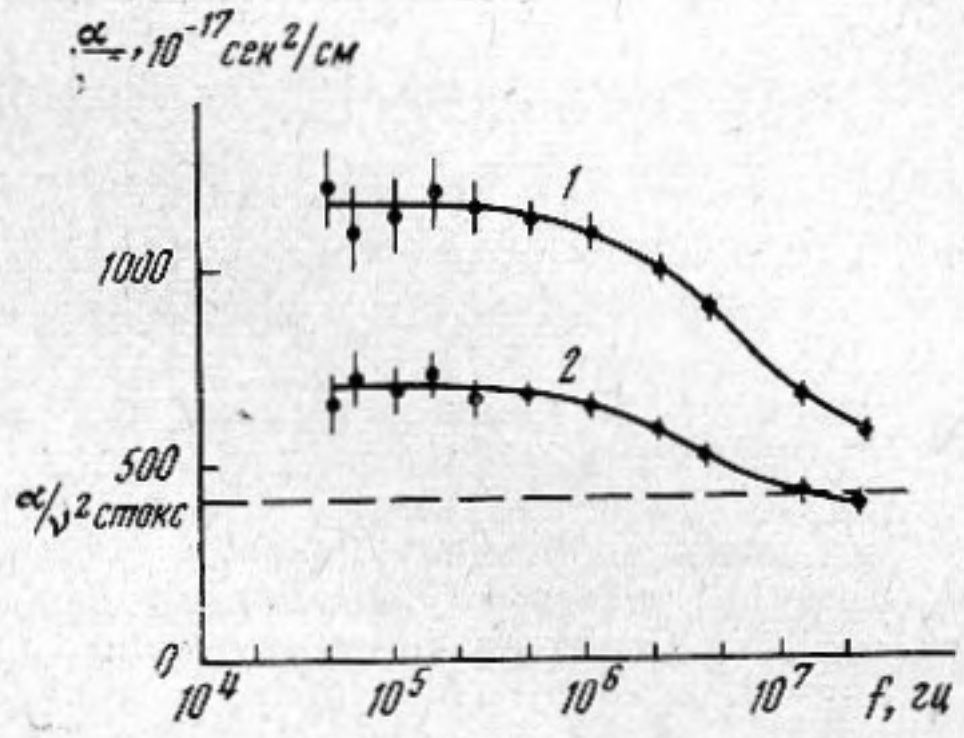
Во время измерений сосуд помещался в камеру воздушного термостата. Температура в жидкости поддерживалась с точностью 0,2° С. Перед измерениями жидкости обезгаживались путем кипячения в течение нескольких часов при пониженном давлении.

В качестве эталонной жидкости во всех случаях применялась вода. Для внесения поправок на поглощение в стенках снималась частотная зависимость величины β_n при давлении воздуха в камере, равном 30 *мм* рт. ст. График этой зависимости приведен на фиг. 2.

Применение метода статистической реверберации на высоких частотах ограничивается тем обстоятельством, что для возбуждения диффузного звукового поля затухание на расстоянии, равном среднему диаметру сосуда, должно быть мало, т. е. $\alpha_0\sqrt[3]{V}\ll 1$, где V — объем сосуда. Для такой сильно поглощающей жидкости, как касторовое масло, это условие не выполняется уже начиная с частоты 300 *кгц*. Поэтому измерения на более высоких частотах мы проводили импульсным методом замещения.



Фиг. 2



Фиг. 3

Оценка погрешностей проведена по данным измерений в водном растворе $MgSO_4$ (0,1 *моль/л*), в котором, как показали Куртце и Тамм [4], величина α/f^2 постоянна на частотах ниже 1 *мгц*. При этом они применяли экспериментальные сосуды объемом до 100 *л*. Наши измерения в этом растворе проводились реверберационным методом на частотах 50 *кгц* — 1 *мгц* и методом замещения на частотах 0,5—4 *мгц* в сосудах объемом 0,5 *л*. Разброс значений величины α/f^2 в диапазоне 50—100 *кгц* не превышал 10%, в диапазоне 100 *кгц* — 1 *мгц* — 7%. Расхождение наших результатов с данными работы [4] не превышало 10%.

Однако по этим данным трудно оценить влияние вязкостных потерь на измерения, поскольку поглощение в растворе $MgSO_4$ определяется в основном объемной вязкостью η_v, а вязкостные потери наиболее существенны при измерениях в жидкостях, для которых выполняется условие $\eta_v \leqslant \eta_s$. К таким жидкостям относятся, например, растительные масла. Поэтому влияние вязкостных потерь оценивалось по данным измерений в льняном и хлопковом маслах. В обоих этих маслах по данным работ [5, 6] на частотах выше 4 *мгц* объемная вязкость отсутствует. Результаты наших измерений представлены на фиг. 3, где кривая *1* соответствует льняному маслу (t=20° С), кривая *2* — хлопковому маслу (t=30° С). Данные для частот выше 4 *мгц* получены стандартным импульсным методом. Из кривых видно, что на частотах ниже 10 *мгц* имеет место релаксация объемной вязкости. На частотах ниже 500 *кгц* величина α/f^2 принимает постоянное значение, следовательно, в этой области частот выполняется условие $\omega\tau\ll 1$, где τ — время релаксации вязкости, $\omega=2\pi f$. Отсюда также следует, что вязкостные потери не влияют на измерения, так как они могут только завысить величину поглощения. Разброс значений α/f^2 не превышает 10% для частот выше 100 *кгц* и 15% в диапазоне 50—100 *кгц*. Эти величины, по-видимому, и определяют погрешность измерений в жидкостях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Скучик. Основы акустики. М., Изд-во иностр. лит., 1959, 364—377.
2. L. E. Lawley, R. D. C. Reed. A reverberation method for the measurement of the absorption of ultrasonics in liquids. Acustica, 1955, 5, 6, 316.
3. T. Ohsawa, Y. Wada. Acoustic relaxations in toluene and alcohols in the frequency

range of 10 to 300 kHz measured by the resonance reverberation method. Japan. J. Appl. Phys., 1969, 8, 4, 411.
4. G. Kurtze, K. Tamm. Sound absorption in water and in electrolytes. Acustica, 1953, 1, 33.
5. И. Г. Михайлов. Поглощение ультразвуковых волн в вязких жидкостях. Акуст. ж., 1957, 3, 2, 177.
6. А. А. Бердыев, Б. Хемраев, М. Г. Шубина. Поглощение ультразвуковых волн в некоторых растительных маслах. Изв. АН ТуркмССР. Серия ФТХ и ГН, 1969, 3, 105.

Ленинградский государственный университет
им. А. А. Жданова
Научно-исследовательский физический институт

Поступила
16 апреля 1973 г.