АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XI 1965 Вып. 1

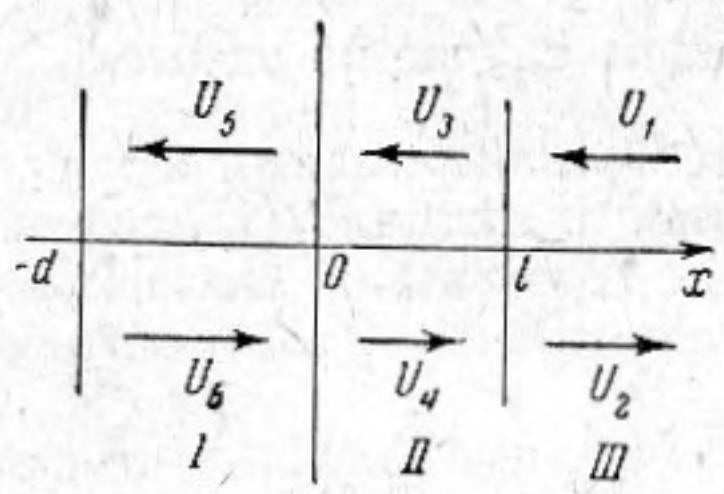
УДК 534.24/.833.53

О ПРЕОБРАЗОВАНИИ УПРУГОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРИ ОТРАЖЕНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ ОТ ПЬЕЗОВИБРАТОРА

А. С. Голубев, В. Е. Иванов, Л. А. Яковлев

Получены выражения для коэффициента отражения ультразвуковых волн от пьезопластинки в режиме приема с учетом преобразования механической энергии в электрическую. Анализируются условия, при которых потери на преобразование минимальны. Результаты расчетов проверены экспериментально.

Импульсный метод измерения затухания ультразвука основан на сравнении амплитуд последовательных эхо-сигналов, возникающих при многократных отражениях звукового импульса от плоскопараллельных граней образца. Точное определение коэффициента затухания требует учета дифракционных эффектов у преобразователя [1], а также потерь, обусловленных преобразованием части энергии в электрическую при приеме эхо-сигналов. Настоящая работа посвящена исследованию последнего вида потерь.



Фиг. 1

При измерении затухания в качестве пьезовибратора используется кварцевая пластинка *I*, нагруженная на исследуемый образец *III* через контактирующую прослойку *II* (фиг. 1). Поперечные размеры пьезопластинки обычно значительно превышают длину волны ультразвука. Это дает возможность в теоретическом рассмотрении использовать одномерное приближение. Тогда выражения для упругих смещений можно написать так:

$$u_1 = U_1 \exp(-iq_3x), \qquad u_4 = U_4 \exp(iq_2x),$$
$$u_2 = U_2 \exp(iq_3x), \qquad u_5 = U_5 \exp(-iq_1x),$$
$$u_3 = U_3 \exp(-iq_2x), \qquad u_6 = U_6 \exp(iq_1x),$$

где q_1, q_2, q_3 — волновые числа для пьезовибратора, промежуточного слоя и исследуемого образца. Временной множитель $\exp(-i\omega t)$ для сокращения записи опущен. Механическими потерями в пьезопластинке и промежуточном слое мы пренебрегаем ввиду их малости. В этом случае модуль коэффициента отражения звука $|r|$ от границы раздела образец — слой определяется потерями, связанными с преобразованием механической энергии в электрическую.

Для нахождения $r = u_2 / u_1$ воспользуемся уравнениями пьезоэффекта и условиями равенства упругих смещений и напряжений на границах раздела. Уравнения пьезоэффекта для гармонических колебаний напишем

в виде [2]

$$\sigma = c^D \frac{\partial u}{\partial x} - e\frac{V}{d} - \frac{4\pi e^2}{\varepsilon^u d}(U_0 - U_{-d}),$$

$$\dot{I} = -i\omega\frac{\varepsilon^u S}{4\pi d}V - i\omega\frac{eS}{d}(U_0 - U_{-d}). \tag{1}$$

Здесь σ — упругое напряжение, c^D — действующий модуль упругости при постоянной индукции, e — действующая пьезоэлектрическая постоянная, ε^u — диэлектрическая проницаемость при постоянной деформации, ω — круговая частота, d и S — толщина и площадь пьезопластинки, $(U_0 - U_{-d})$ — разность смещений ее граней, I — ток, протекающий через пластинку и V — разность потенциалов на ее обкладках.

В режиме приема V можно выразить через проводимость Y внешней электрической цепи:

$$V = \frac{-i\omega\frac{eS}{d}(U_0 - U_{-d})}{i\omega C_п - Y}, \tag{2}$$

где $C_п = \varepsilon^u S / 4\pi d$ — электрическая емкость пластинки. Используя граничные условия, получаем систему пяти уравнений, решение которой с учетом формулы (2) дает для тонких промежуточных слоев ($q_2 l \ll 1$) *

$$r = -\frac{\left[(1 - 2\chi/z_3)\cos q_1 d + \left(2\chi/z_3 - \frac{z_1}{z_2}q_2 l \sin q_1 d\right)\right] + i\left[(z_1/z_3 - \chi/z_1)\sin q_1 d + \frac{2\chi}{z_2}q_2 l(1 - \cos q_1 d)\right]}{\left[-(1 + 2\chi/z_3)\cos q_1 d + \left(2\chi/z_3 + \frac{z_1}{z_2}q_2 l \sin q_1 d\right)\right] + i\left[(z_1/z_3 + \chi/z_1)\sin q_1 d - \frac{2\chi}{z_2}q_2 l(1 - \cos q_1 d)\right]}. \tag{3}$$

Здесь $\chi = e^2 S / d^2 \left[1 / i\omega C_п - 1 / (i\omega C_п - Y)\right]$, а z_1, z_2, z_3 — удельные акустические сопротивления пьезовибратора, промежуточного слоя и материала исследуемого образца.

Анализ полученного соотношения в общем виде затруднителен. Для вибратора, работающего на одной из нечетных гармоник ($q_1 d = n\pi$, $n = 1, 3, 5 \ldots$), выражение (3) упрощается:

$$r = \frac{1 - \frac{4\chi}{z_2}(z_2/z_3 + iq_2 l)}{1 + \frac{4\chi}{z_2}(z_2/z_3 - iq_2 l)}. \tag{4}$$

Из выражения (4) видно, что коэффициент отражения зависит от акустического сопротивления материала исследуемого образца, параметров вибратора и электрической цепи, на которую он нагружен. В режимах холостого хода и короткого замыкания, а также при чисто реактивной нагрузке $|r| = 1$. Физически этот результат связан с отсутствием электрических потерь (механические потери в пьезопластинке и промежуточном слое мы не учитываем).

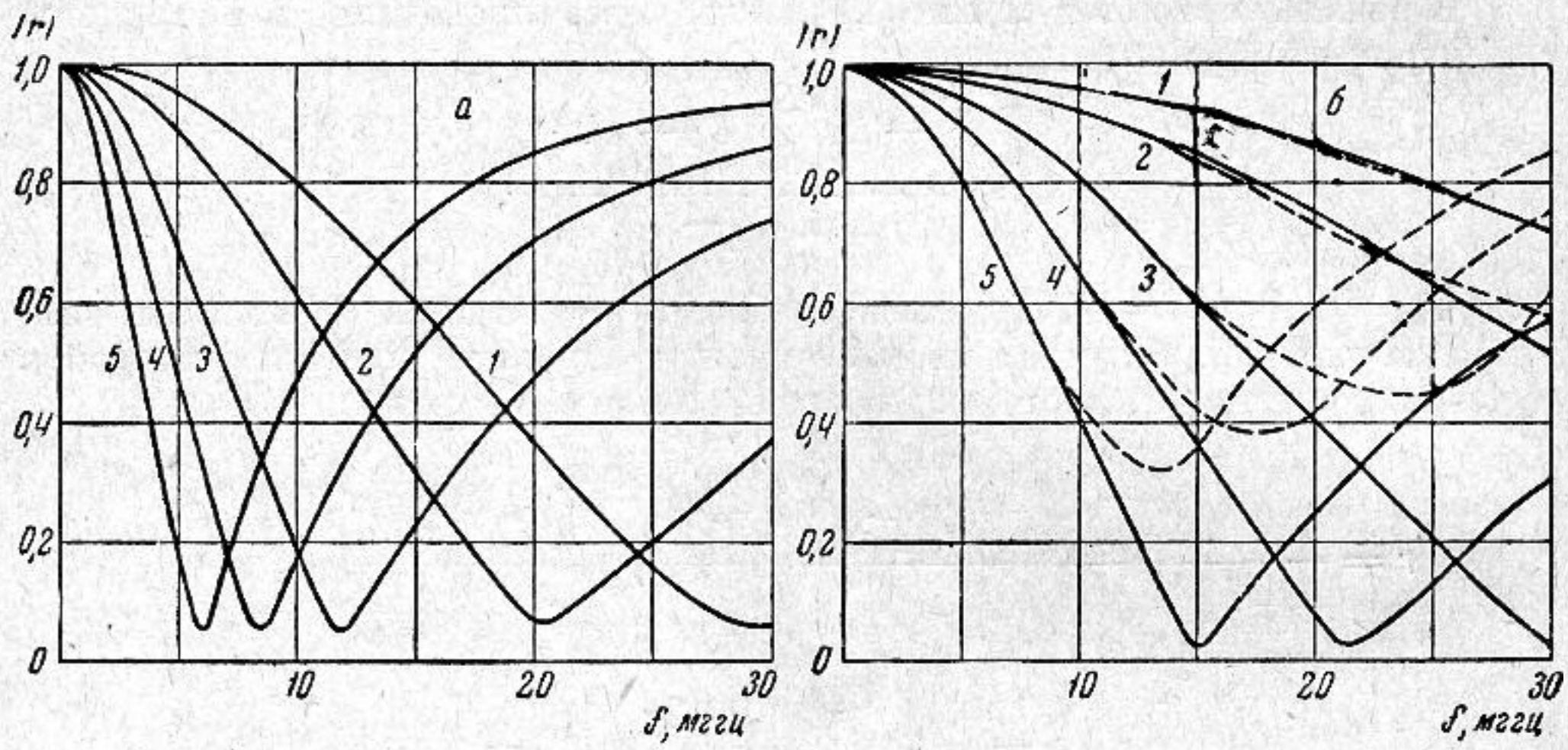
Для дальнейшего анализа необходимо задаться видом электрической

* Как показали эксперименты, эквивалентная толщина промежуточного слоя для шлифованной поверхности образца составляет $1 \div 3$ *мк*.

нагрузки вибратора. Пьезовибратор обычно является частью резонансного контура, настроенного на частоту падающей волны. В этом случае $\chi = e^2S / d^2(1 / i\omega C_п + R_0)$, где R_0 — эквивалентное сопротивление контура. Тогда из формулы (4) находим

$$r = \frac{\varepsilon^u v_1^2 z_3 - 16e^2\varepsilon^u SR_0 \frac{f_n^2}{n^2} - 32\pi e^2 l \frac{v_1 z_3 f_n}{v_2 z_2 n} + i16e^2\left(\frac{v_1}{n} - 2\pi\varepsilon^u lSR_0 \frac{z_3 f_n^3}{v_2 z_2 n^2}\right)}{\varepsilon^u v_1^2 z_3 + 16e^2\varepsilon^u SR_0 \frac{f_n^2}{n^2} - 32\pi e^2 l \frac{v_1 z_3 f_n}{v_2 z_2 n} - i16e^2\left(\frac{v_1}{n} + 2\pi\varepsilon^u lSR_0 \frac{z_3 f_n^3}{v_2 z_2 n^2}\right)} \tag{5}$$

где v_1 — скорость звука в материале пьезопластинки, v_2 — скорость звука



Фиг. 2

в слое, f_n — частота n гармоники. Полагая $l = 0$, находим

$$r = \frac{\varepsilon^u v_1^2 z_3 - 16e^2\varepsilon^u SR_0 \frac{f_n^2}{n^2} + i16e^2 \frac{v_1}{n}}{\varepsilon^u v_1^2 z_3 + 16e^2\varepsilon^u SR_0 \frac{f_n^2}{n^2} - i16e^2 \frac{v_1}{n}} \tag{6}$$

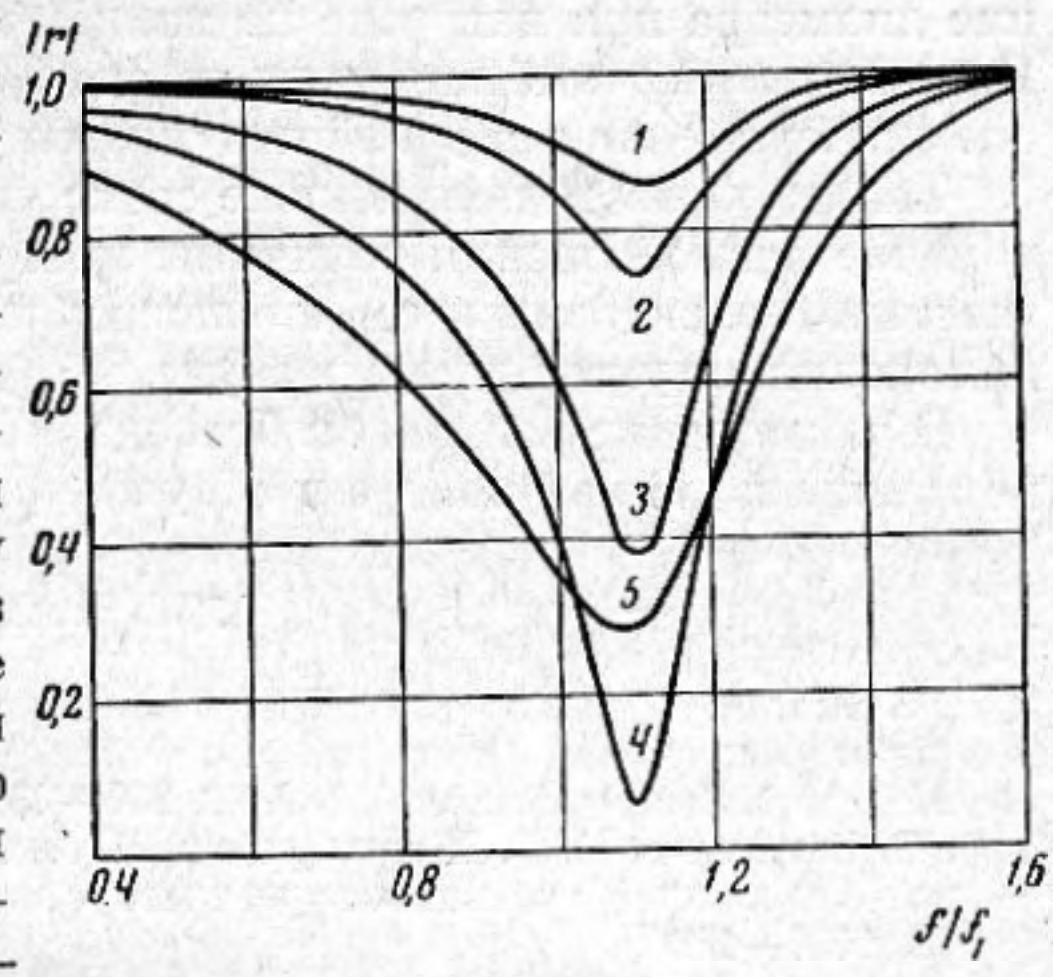
Этот случай реализуется при нагрузке пьезовибратора на жидкость. Из выражения (6) видно, что модуль коэффициента отражения имеет минимум при $R_0 \approx v_1^2 z_3 n^2 / 16e^2 S f_n^2$. Поскольку $\varepsilon^u v_1 z_3 n \gg 16e^2$, расчет по формуле (6) для основной частоты пьезопластинки и ее нечетных гармоник дает практически одинаковые результаты; исключение составляет область минимума кривых.

На фиг. 2 *а*, *б* представлены частотные зависимости модуля коэффициента отражения, рассчитанные по формуле (6) для полуволновых кварцевых пластинок *X*-среза при нагрузке на воду ($z_3 = 1{,}5 \cdot 10^5$ *ак·ом*; фиг. 2, *а*) и на монокристалл NaCl ($z_3 = 10{,}4 \cdot 10^5$ *ак·ом*; фиг. 2, *б*). Кривая *1* отвечает $R_0 = 0{,}5$ *ком*, *2* — 1 *ком*, *3*—3 *ком*, *4*—6 *ком* и *5*—12 *ком*. Диаметр пластинок принят равным 18 *мм*. Пунктирные кривые на фиг. 2, *б* рассчитаны с учетом масляной контактирующей прослойки ($z_2 = 1{,}28 \cdot 10^5$ *ак·ом*) по формуле (5) при $l = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ *см*.

Анализ формулы (6) и кривых фиг. 2 показывает, что потери на преобразование получаются выше для меньших значений акустического сопротивления исследуемой среды. Потери зависят также от величины эквивалентного сопротивления контура R_0. С увеличением R_0 потери возрастают, достигают максимума и затем убывают. Для уменьшения потерь целесооб-

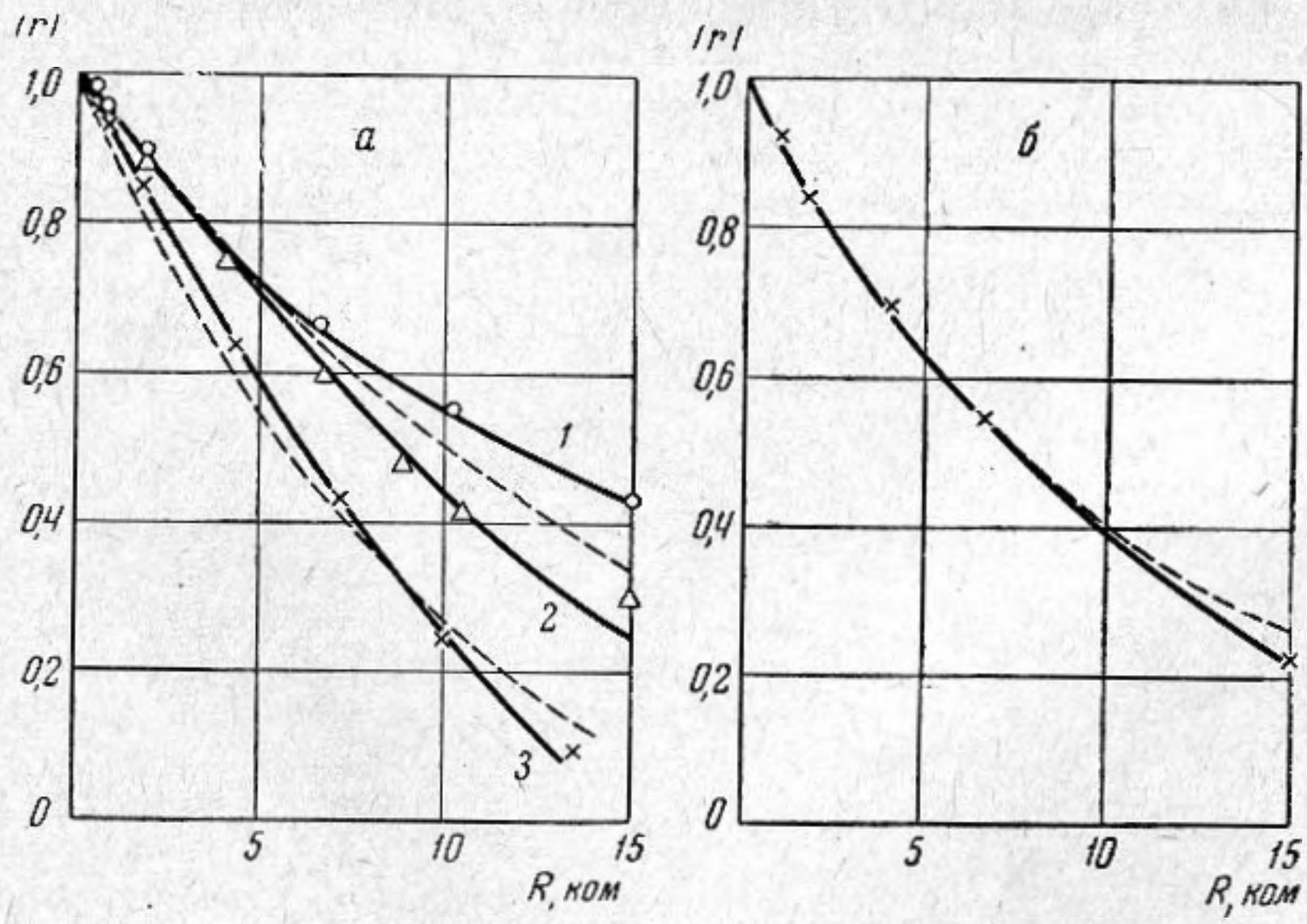
разно работать с минимально возможными R_0, так как при больших значениях сопротивления контура имеет место искажение формы электрических импульсов. При нагрузке на твердую среду существенное влияние на коэффициент отражения может оказывать промежуточный слой. Как видно из фиг. 2, *б*, учет влияния промежуточного слоя необходим на высоких частотах, начиная, примерно, с 10—15 *мггц*.

Практически возможна работа пьезовибратора на частотах, отличающихся от резонансной (f_1). На фиг. 3 показана зависимость $|r| = F(f/f_1)$, рассчитанная по формуле (3) при нагрузке на монокристалл NaCl при прежних значениях эквивалентного сопротивления контура, l — $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ *см* и $f_1 = 15$ *мггц*. Ход кривых показывает, что максимум потерь имеет место на частоте f_m, соответствующей максимальной чувствительности пьезовибратора [2]. Поэтому необходимо работать на частоте, несколько отличной от f_m, если, конечно, это не ведет к значительной потере чувствительности.



Фиг. 3

Полученные результаты проверялись экспериментально по следующей блок-схеме. Генератор импульсов высокой частоты возбуждал пьезовибратор *I*, притертый через тонкую масляную прослойку к образцу или смонтированный в специальной кювете при работе на жидкость. На противоположной стороне образца (кюветы) соосно с вибратором *I* был расположен пьезовибратор *II*, который подключался к резонансному контуру *LCR*. Регулировкой величины R эквивалентное сопротивление контура менялось в пределах 0—$1{,}5 \cdot 10^4$ *ом*. Эхо-сигналы, принятые вибратором *I*, через усилитель подавались на осциллоскоп. Величина коэффициен-



Фиг. 4

та отражения r от вибратора *II* определялась путем сравнения амплитуды первого эхо-сигнала при данном значении R_0 с амплитудой при закорочен-

ном контуре ($r = 1$). В качестве пьезовибраторов использовались кварцевые пластинки X-среза диаметром 18 *мм*. Экспериментальные зависимости при работе на воду показаны на фиг. 4, *а*. Сплошная кривая *1* отвечает частоте 6 *мггц*, *2* — 18 *мггц* (3-я гармоника), *3* — 8 *мггц*. Видно, что начальные участки кривых *1* и *2*, как и следует из теории, совпадают. Опытные данные в случае нагрузки на монокристалл NaCl приведены на фиг. 4, *б*. Измерения проводились на частоте 15 *мггц*.

Следует отметить, что в экспериментах из-за необходимости работы на непроводящую среду (NaCl) нами использовались пьезовибраторы с электродами специальной формы, причем внешний электрод занимал только центральную часть пластинки. Это приводило к уменьшению действующего диаметра вибратора. Так, в случае нагрузки на твердое тело действующий диаметр был равен 14 *мм*, на воду — 11 *мм*. Дополнительное уменьшение диаметра при нагрузке на жидкость связано с креплением пластинки. Результаты расчета показаны на фиг. 4, *а*, *б* пунктиром. Видно, что согласие эксперимента с теорией получается удовлетворительным.

Таким образом, полученные соотношения могут быть использованы для количественной оценки величины потерь на преобразование механической энергии в электрическую, что позволяет значительно повысить точность измерения затухания ультразвука.

В заключение выражаем благодарность Л. Г. Меркулову за постоянное внимание к данной работе и обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Seki, A. Granato, R. Truell. Diffraction effects in the ultrasonic fild of a piston source and their importance in the accurate measurement of attenuation. J. Acoust. Soc. America, 1956, 28, 2, 230—238.
2. В. Е. Иванов, Л. Г. Меркулов, Л. А. Яковлев. Исследование демпфированного пьезопреобразователя ультразвукового дефектоскопа. Завод. лаб., 1962, 28, 12, 1459—1464.

Ленинградский электротехнический институт
им. В. И. Ульянова (Ленина)

Поступила в редакцию
10 июня 1963 г.