АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том IV 1958 Вып. 3

К РАСЧЕТУ ПОРШНЕВОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ БЕЗ УЧЕТА ВНУТРЕННИХ ПОТЕРЬ

А. А. Ананьева

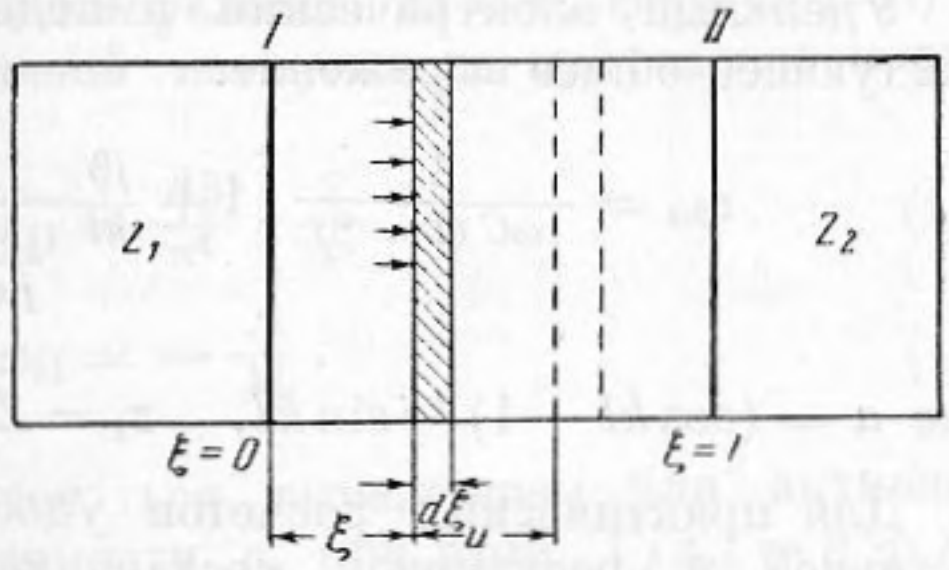
Выполненный в общем виде Н. Н. Андреевым расчет пьезоэлектрического излучателя в форме плоской безграничной пластины, колеблющейся по толщине без внутренних потерь, конкретизирован на случай одностороннего и двустороннего излучения в различные среды.

Рассчитаны и приведены в виде графиков частотные зависимости активной и реактивной составляющих удельного электрического импеданца, а также частотные зависимости звукового давления при постоянном токе и при постоянном напряжении идеальных плоских поршневых излучателей из кварца и титаната бария при работе их в воде.

Рекомендуется оценивать материал излучателей по максимальному отношению активного сопротивления к реактивному.

Показано, что при выборе материалов для узкополосных излучателей необходимо выбирать материал с большим пьезомодулем, большой плотностью и большим модулем упругости.

Общие вопросы теории расчета пьезоэлектрических излучателей освещены в ряде работ [1—5]. Приближенные формулы расчета давались многими авторами, в том числе Гутиным [6] и Харкевичем [7, 8]. Нашей задачей было провести анализ волнового расчета пьезоэлектрического излучателя в применении к конкретным пьезоэлектрическим материалам и к применяемым на практике простейшим способам нагрузки. За основу нами принят расчет колеблющейся по толщине пьезоэлектрической пластинки, нагруженной на произвольные нагрузки Z_1 и Z_2, данный в общем виде Андреевым [5]. Поскольку этот расчет напечатан в мало доступном журнале, мы, с согласия автора, приводим его основные положения. Схема расчета одномерной задачи представлена на фиг. 1. Толщина пластины — l (поперечный размер не ограничен), ξ — координата, u — смещение. Внутреннее трение в материале пластины не учитывается.



Фиг. 1

Исходными уравнениями для расчета являются: уравнение движения элементарного пьезоэлектрического слоя $\mu\partial^2u/\partial t^2=-dX/d\xi$; два уравнения линейного пьезоэффекта $x=-sX-dE$, $P=-dX+\eta E$, или, если поляризацию заменить индукцией, $D=\varepsilon(E-\alpha X)$; два определения — деформации и напряженности электрического поля $\partial u/\partial\xi=x$, $-\partial V/\partial\xi=E$, и условие отсутствия свободных зарядов в диэлектрике $\partial D/\partial\xi=0$.

В этих уравнениях использованы следующие обозначения: μ — плотность пьезоэлектрика, X — механические напряжения, x — деформация, P — поляризация, D — индукция, E — напряженность электрического поля, s — упругая постоянная, d — пьезоэлектрический модуль, ε — диэлектрическая постоянная, η — поляризуемость.

После проведения операций, связанных с разделением переменных, уравнения для деформаций, электрического поля и механических напря-

жений принимают вид:

$$\left.\begin{aligned} -\omega^2 X &= c^2 \frac{\partial^2 X}{\partial \xi^2} - \omega^2 X_0 \\ -\omega^2 E &= c^2 \frac{\partial^2 E}{\partial \xi^2} - \omega^2 E_0 \\ -\omega^2 x &= c^2 \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} \end{aligned}\right\}, \tag{1}$$

где c — скорость звука в пьезоматериале, $\alpha = 4\pi d / \varepsilon$ — пьезоэлектрическая жесткость материала.

Общее решение системы (1) представляется в виде плоских волн (прямой и обратной) для деформации, поля и механических напряжений:

$$\left.\begin{aligned} X &= X_0 + X_+ e^{-jk\xi} + X_- e^{jk\xi} \\ E &= E_0 + E_+ e^{-jk\xi} + E_- e^{jk\xi} \\ x &= x_+ e^{-jk\xi} + x_- e^{jk\xi} \end{aligned}\right\}. \tag{2}$$

Связи между постоянными интегрирования определяются подстановкой общих решений (2) в исходные уравнения пьезоэффекта и использованием выражений для импеданцев Z_1 и Z_2:

$$-Z_1 = p_1 / \dot{u}_1 = X_1 / S_1 \dot{u}_1, \quad Z_2 = p_2 / \dot{u}_2 = X_2 / S_2 \dot{u}_2,$$

где S_1 и S_2 — соответствующие площади излучателя, в дальнейшем принятые равными 1 *см*². Электрическое напряжение на обкладках пьезоэлектрика выражается в форме $V = -\int_0^l E d\xi$. Плотность тока определяется как изменение удельного поверхностного заряда со временем $i = \partial\sigma / \partial t$.

Удельный электрический импеданц* $z_{эл} = V / i$ при этом принимает следующее общее выражение:

$$z_{эл} = \frac{1}{j\omega C(1-\beta)} \left[1 + \frac{j\beta}{kl} \frac{1}{\dfrac{1}{j \sin kl} + \dfrac{(z_1 + a)(z_2 + a)}{(z_1 + a) + (z_2 + a)}} \right], \tag{3}$$

где $a = (\cos kl - 1) / j \sin kl$, $z_1 = Z_1 / \mu c$, $z_2 = Z_2 / \mu c$, $\beta = \dfrac{d\alpha}{s}$.

Для практических расчетов удобнее пользоваться выражениями для активной и реактивной составляющих удельного электрического импеданца r и x; при этом $z_{эл} = r + jx$. Расчетные формулы в общем случае для любой нагрузки на акустической стороне $z = z_R + jz_x$ принимают вид:

$$r_{\mathrm{I}} = A \frac{\beta}{(kl)^2} \frac{z_R \operatorname{tg}^2 (kl/2)}{z_R \operatorname{ctg}^2 kl + (1 + z_x \operatorname{ctg} kl)^2}, \quad r_{\mathrm{II}} = A \frac{2\beta}{(kl)^2} \frac{z_R}{[\operatorname{ctg}(kl/2) - z_x]^2 + z_R^2}, \tag{4}$$

$$x_{\mathrm{I}} = -\frac{A}{kl} \left[1 - \frac{\beta}{kl} \cdot \frac{2 \operatorname{tg}(kl/2) + z_x(\operatorname{tg} kl \cdot z_x + 1) + z_R^2 \operatorname{ctg} kl}{z_R^2 \operatorname{ctg}^2 kl + (1 + z_x \operatorname{ctg} kl)^2} \right],$$

$$x_{\mathrm{II}} = -\frac{A}{kl} \left[1 - \frac{2\beta}{kl} \cdot \frac{\left(\operatorname{ctg} \dfrac{kl}{2} - z_x\right)}{\left(\operatorname{ctg} \dfrac{kl}{2} - z_x\right)^2 + z_R^2} \right]. \tag{5}$$

---

* Т. е. импеданц, рассчитанный на 1 *см*² площади поперечного сечения преобразователя.

В этих и во всех приведенных далее формулах параметры с индексом I относятся к случаю одностороннего излучения в среду ($z_1 = z$, $z_2 = 0$); параметры с индексом II относятся к случаю двустороннего симметричного излучения в среду ($z_1 = z_2 = z$).

Постоянная A в этих формулах не зависит от kl (или для пластины заданной толщины, изготовленной из определенного материала, не зависит от частоты).

$$A = \frac{kl}{\omega C(1-\beta)} = \frac{4\pi l^2}{\varepsilon s(1-\beta)}.$$

Для частоты, соответствующей условию $kl = \pi$, формулы (4) и (5) принимают вид:

$$r_{\mathrm{I}} = A\frac{\beta}{\pi^2}\cdot\frac{4z_R}{z_R^2+z_x^2}, \quad r_{\mathrm{II}} = A\frac{\beta}{\pi^2}\cdot\frac{2z_R}{z_R^2+z_x^2}, \tag{6}$$

$$x_{\mathrm{I}} = -\frac{A}{\pi}\left[1-\frac{4\beta}{\pi}\frac{z_x}{z_R^2+z_x^2}\right]. \quad x_{\mathrm{II}} = -\frac{A}{\pi}\left[1-\frac{2\beta}{\pi}\frac{z_x}{z_R^2+z_x^2}\right]. \tag{7}$$

Для частного случая активной нагрузки на излучатель $z = z_R = \mu c / \rho_H c_H$ (c_H и ρ_H — скорость звука и плотность для среды, в которой работает излучатель) формулы для активной и реактивной составляющих электрического импеданца принимают удобный для расчета вид:

$$r_{\mathrm{I}} = A\frac{\beta z}{(kl)^2}\cdot\frac{\operatorname{tg}^2(kl/2)}{z^2\operatorname{ctg}^2 kl+1}, \quad r_{\mathrm{II}} = A\frac{2\beta}{(kl)^2}\cdot\frac{z}{\operatorname{ctg}^2(kl/2)+z^2}, \tag{8}$$

$$x_{\mathrm{I}} = -\frac{A}{kl}\left[1-\frac{\beta}{kl}\cdot\frac{2\operatorname{tg}(kl/2)+z^2\operatorname{ctg} kl}{z^2\operatorname{ctg}^2 kl+1}\right],$$

$$x_{\mathrm{II}} = -\frac{A}{kl}\left[1-\frac{\beta}{kl}\frac{2\operatorname{ctg}(kl/2)}{\operatorname{ctg}^2(kl/2)+z^2}\right]. \tag{9}$$

Для частоты, при которой выполняется условие $kl = \pi$, формулы (8) и (9) упрощаются и для случая активной нагрузки на излучатель могут быть представлены так:

$$r_{\mathrm{I}} = \frac{A\beta}{\pi^2}\cdot\frac{4}{z}, \quad r_{\mathrm{II}} = \frac{A\beta}{\pi^2}\cdot\frac{2}{z}, \tag{10}$$

$$x_{\mathrm{I}} = -\frac{A}{kl}. \quad x_{\mathrm{II}} = -\frac{A}{kl}. \tag{11}$$

Часто при расчетах удобнее пользоваться выражением для активной составляющей электрической проводимости a, при этом $1/z_{\text{эл}} = a + jb$. Для частного случая активной нагрузки на излучатель

$$a_{\mathrm{I}} = \frac{1}{A}\cdot\frac{\beta z(1+\operatorname{ctg}^2 kl)\operatorname{tg}^2(kl/2)}{\left[(\operatorname{ctg}^2 kl+1)-\frac{\beta}{kl}\left(2\operatorname{tg}\frac{kl}{2}+\operatorname{ctg} kl\right)\right]^2+\left[\frac{\beta}{kl}\cdot\operatorname{tg}^2\frac{kl}{2}\right]^2}.$$

$$a_{\mathrm{II}} = \frac{1}{A}\frac{2\beta z}{\left(\frac{2\beta}{kl}-\operatorname{ctg}\frac{kl}{2}\right)^2+z^2}. \tag{12}$$

Для частоты, соответствующей условию $kl = \pi$, последняя формула принимает вид:

$$a_{\mathrm{I}} = \frac{1}{A}\frac{4\beta z\pi^2}{16\beta^2+\pi^2 z^2}. \quad a_{\mathrm{II}} = \frac{2\beta z\pi^2}{A(4\beta^2+z^2\pi^2)}. \tag{13}$$

Максимальная величина активной составляющей электрической проводимости для симметричного излучателя определяется выражением $a_{\mathrm{II}\,\max} = 2\beta / Az$.

Зная величины активной и реактивной составляющих электрического импеданца (или составляющих электрической проводимости), можно определить две основные характеристики излучателя — чувствительность по току p/i и чувствительность по напряжению p/E:

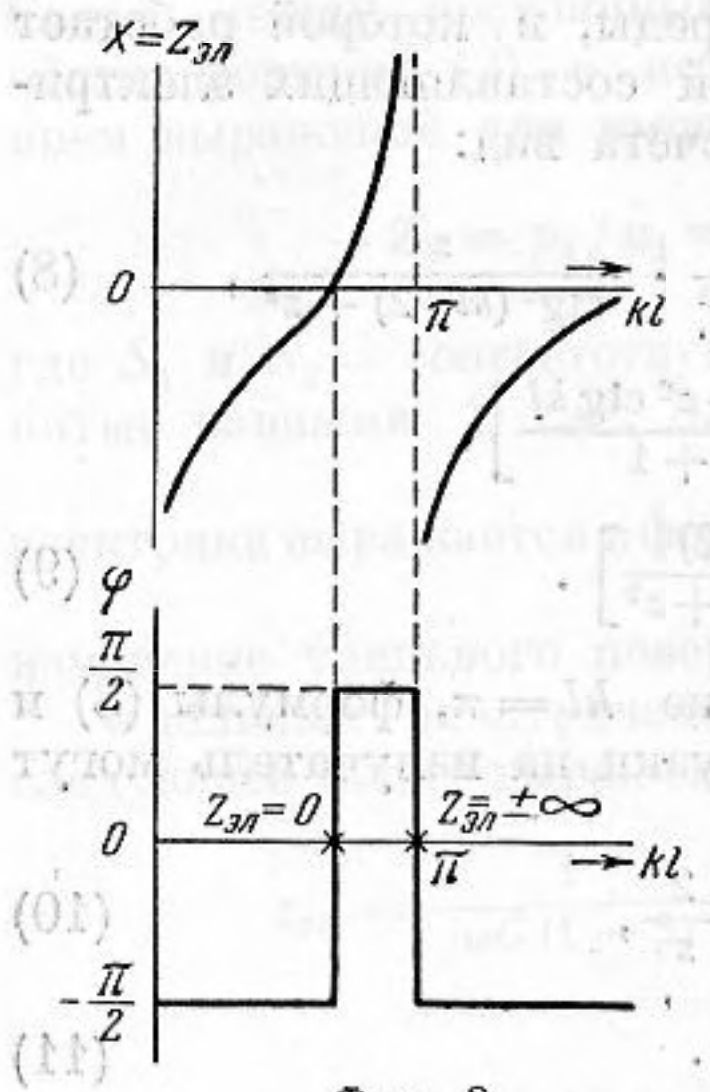
$$\left(\frac{p}{i}\right)_{\text{I}} = \sqrt{\rho_H c_H r \cdot 10^7}\ бар/А, \quad \left(\frac{p}{i}\right)_{\text{II}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\rho_H c_H r \cdot 10^7}\ бар/А, \tag{14}$$

$$\left(\frac{p}{E}\right) = \sqrt{\rho_H c_H a \cdot 10^7} = \cos\varphi \sqrt{\frac{\rho_H c_H}{r} \cdot 10^7}\ бар/в.$$

$$\left(\frac{p}{E}\right)_{\text{II}} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\rho_H c_H \cdot a \cdot 10^7} = \frac{\cos\varphi}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{\rho_H c_H}{r} \cdot 10^7}\ бар/в. \tag{15}$$

В формулах (14) и (15) $\cos\varphi = r/|z_{эл}|$; r принято в омах.

В частном случае отсутствия нагрузок ($z_1 = z_2 = 0$), как известно, электрический импеданц пьезоэлектрика представляет собою чисто реактивное сопротивление $z_{эл} = \frac{1}{j\omega C(1-\beta)}\left[1 - \frac{2\beta}{kl}\operatorname{tg}\frac{kl}{2}\right]$ и на двух частотах, определяемых уравнениями: $\operatorname{tg} kl/2 = kl/2 \cdot 1/\beta$ и $kl/2 = \pi/2$, обращается в 0 и ∞. Сдвиг фаз между током и напряжением на этих частотах скачком меняет знак (фиг. 2). На частотах, при которых сдвиг фаз равен $+90°$, реактивное сопротивление носит индуктивный характер. Для кварца реактивное сопротивление будет иметь индуктивный характер при $3{,}12 < kl < \pi$; в керамическом титанате бария — при $2{,}94 < kl < \pi$.



Фиг. 2

По приведенным выше формулам нами произведен в качестве примера расчет частотной зависимости удельных величин активной и реактивной составляющих электрического импеданца некоторых интересных для применения в качестве излучателей пьезоматериалов (кварца, титаната бария и т. п.), работающих в воде; при этом толщина пластины $l = 1$ *см*. Вычислены частотные зависимости давления при постоянстве тока через излучатель и при постоянстве электрического напряжения на электродах излучателя $|p/i|$ и $|p/E|$, а также зависимость от частоты коэффициента мощности $\cos\varphi = r/|z_{эл}|$.

При расчете использованы следующие значения параметров пьезоматериалов: для кварца — плотность $\mu = 2{,}65$ *г/см*^{3}, скорость звука $c = 5{,}45 \cdot 10^5$ *см/сек*, пьезомодуль $d = 6{,}9 \cdot 10^{-8}$ CGSE, упругая постоянная $s = 1{,}27 \cdot 10^{-12}$, диэлектрическая постоянная $\varepsilon = 4{,}55$; для титаната бария — $\mu = 5{,}65$ *г/см*^{3}, $c = 4{,}48 \cdot 10^5$ *см/сек*, $d_{33} = 3{,}6 \cdot 10^{-6}$ CGSE, $s = 1{,}1 \cdot 10^{-12}$, $\varepsilon = 1{,}000$; для ниобата свинца (данные Г. Гудмана [9]) — $\mu = 6{,}33$ *г/см*^{3}, $c = 3{,}36 \cdot 10^5$ *см/сек*, $d = 2{,}4 \cdot 10^{-6}$ CGSE; $s = 1{,}445 \cdot 10^{-12}$; $\varepsilon = 280$; для сегнетовой соли (L = срез) — $\mu = 1{,}77$ *г/см*^{3}, $c = 3{,}3 \cdot 10^5$ *см/сек*, $d = 2{,}1 \cdot 10^{-6}$ CGSE, $s = 6{,}0 \cdot 10^{-12}$, $\varepsilon = 65$.

В настоящее время используют излучатели либо на частоте, соответствующей $|p/E|_{max}$, либо на частоте, соответствующей $|p/i|_{max}$; первая частота совпадает с частотой максимума активной проводимости, вторая — с частотой максимума активного сопротивления.

Расчет показал, что эти частоты для керамических излучателей, работающих в воде, отстоят одна от другой довольно далеко и реактивное сопротивление излучателя на этих частотах имеет различное значение. Поэтому для правильной оценки работы излучателя необходимо знать частотный ход основных его параметров (активной и реактивной составляющих

электрического импеданца, $\cos\varphi$, p/i, p/E и т. п.) и особенно расположение следующих частот: частоты максимума активного сопротивления, частоты максимума активной проводимости, частот, соответствующих максимуму и минимуму модуля электрического импеданца и реактивной составляющей импеданца, частоты максимума коэффициента мощности.

В табл. 1 приведены значения kl (причем столбцы I отвечают одностороннему излучению, столбцы II — двустороннему), при которых имеют место условия, сформулированные в крайнем левом столбце таблицы. В табл. 2 сведены соответственные экстремальные значения интересующих нас величин.

Нам представляется интересным проследить частотную зависимость основных параметров двух типов пьезоэлектрических материалов — с малым и с большим коэффициентами электромеханической связи. В качестве представителя первого класса мы выбрали кварц, в качестве представителя второго класса — титанат бария.

Таблица 1

	Кварц		Титанат бария		Ниобат свинца		Сегнетова соль	
	I	II	I	II	I	II	I	II
Минимум $z_{эл}$	3,04	3,00	2,92	2,90	2,87	2,83	2,80	2,70
Максимум $z_{эл}$	3,20	3,02	3,16	3,19	3,17	3,18	3,25	3,30
Минимум x	3,06	3,00	3,08	3,02	3,08	3,00	2,90	2,75
Максимум x	3,20	3,02	3,25	3,20	3,25	3,25	3,30	3,40
Максимум r	3,135	3,13	3,137	3,135	3,137	3,134	3,12	3,04
Максимум (p/i)	3,135	3,13	3,137	3,135	3,137	3,134	3,12	3,04
Максимум (p/E)	3,13	3,13	2,94	2,94	2,89	2,89	2,95	2,95
Максимум $\cos\varphi$	3,135	3,13	—	3,04	—	3,02	3,03	3,00
$\cos\varphi = 1$	—	—	2,95	—	2,92	—	—	—
$\cos\varphi = 1$	—	—	3,11	—	3,11	—	—	—
$x = 0$	—	—	2,95	—	2,92	—	—	—
	—	—	3,11	—	3,11	—	—	—

На фиг. 3, 4, 5 представлены рассчитанные характеристики излучателя из кварца, работающего в воде при одностороннем и двустороннем излучении; на фиг. 6, 7 и 8 — аналогичные характеристики для излучателя из керамического титаната бария. Частотные зависимости основных параметров других пьезоэлектриков, приведенных в таблицах 1 и 2, имеются в отчете Акустического института АН СССР за 1954 год [10].

Приведенные графики относятся к удельным величинам параметров пьезоматериала. Вычисление параметров излучателей площадью S и толщиной пластины l проводится по следующим формулам:

$$R = \frac{1}{l^2 S} r; \; X = \frac{1}{l^2 S} x; \; Z_{эл} = \frac{1}{l^2 S} z_{эл};$$

$$\frac{p}{V} = \frac{1}{l}\left|\frac{p}{E}\right|; \; \frac{p}{I} = \frac{l}{S}\left|\frac{p}{i}\right|; \; Z_{эл} = R + jX,$$

где I — полный ток через излучатель, V — напряжение на излучателе, $Z_{эл}$ — полный электрический импеданц излучателя.

Положение критических частот и вид частотных зависимостей приведенных на фиг. 3—8 величин в масштабе kl остается тем же самым для излучателей в виде плоской пластины или мозаики любых размеров из данного пьезоматериала.

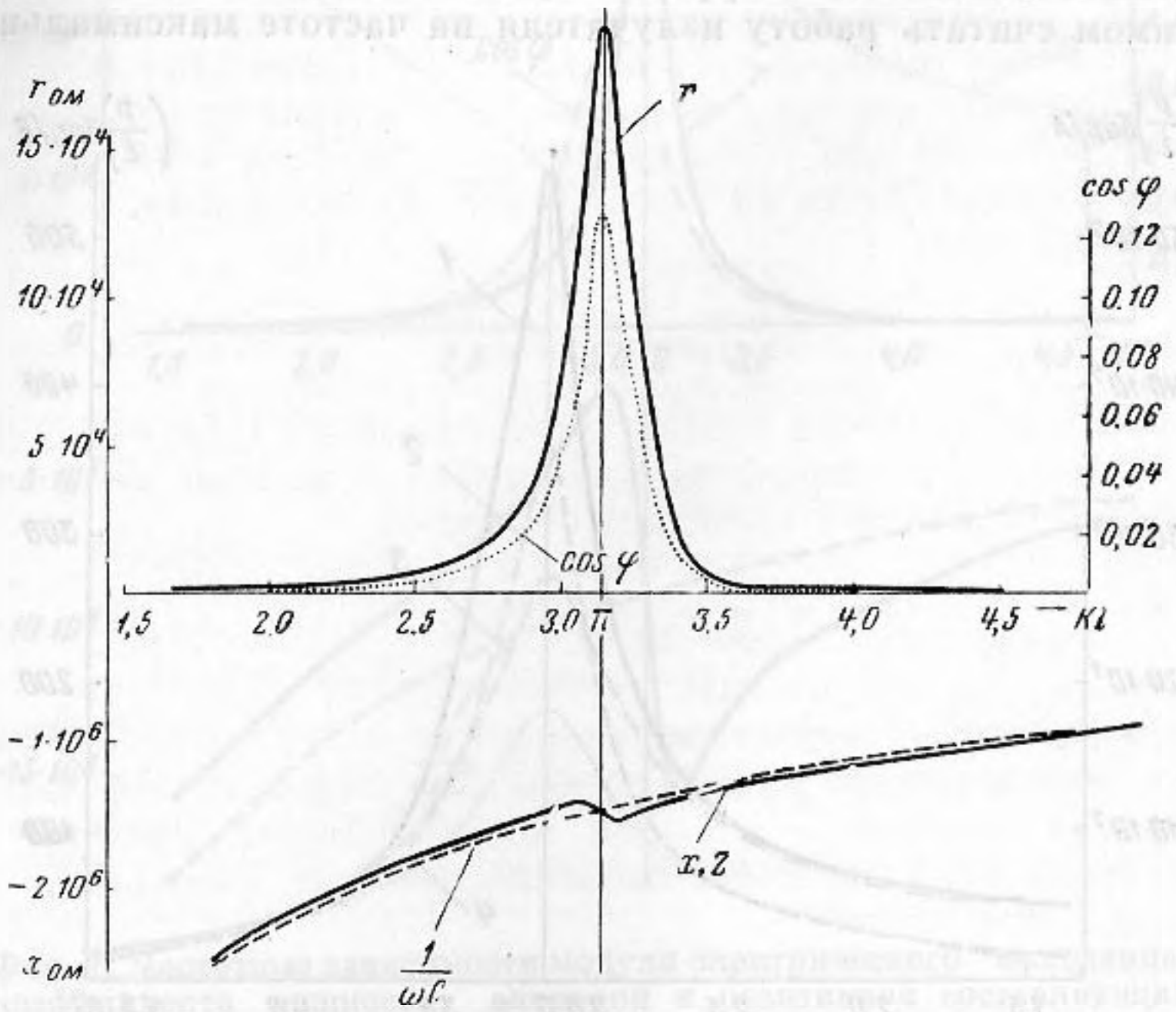
Интересно отметить, что соотношение упругих и пьезоэлектрических параметров в кварце таково, что при работе в воде он имеет очень малый коэффициент мощности. Для пьезоэлектрических материалов с большим коэффициентом электромеханической связи (таких, как титанат бария),

Таблица 2

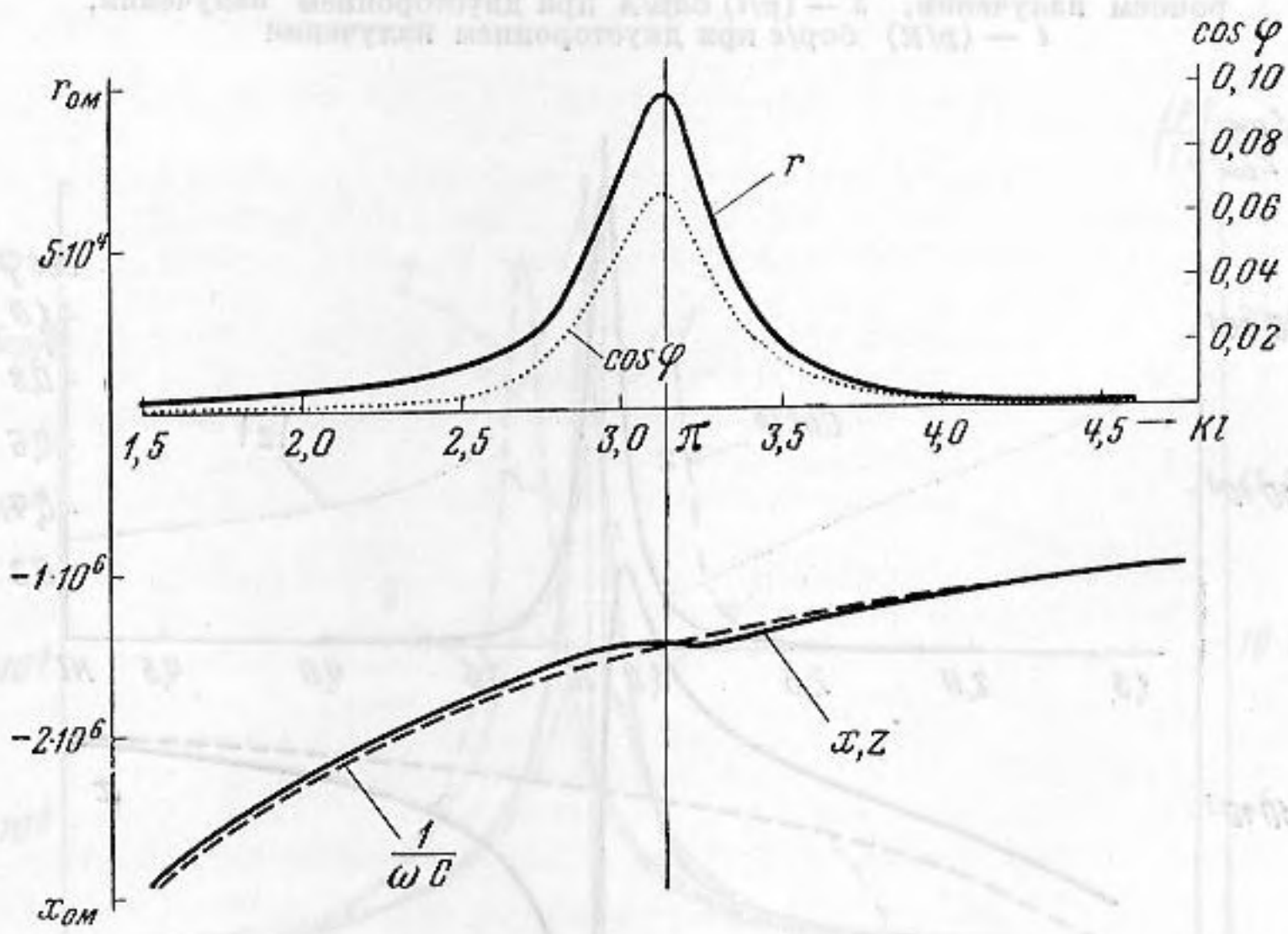
Данные для 1 *см*³ материала

	Кварц		Титанат бария		Ниобат свинца		Сегнетова соль	
	I	II	I	II	I	II	I	II
$\lvert z_{эл} \rvert_{min}$ *ОМ*	$1{,}42 \cdot 10^6$	$1{,}49 \cdot 10^6$	$2{,}96 \cdot 10^3$	$4{,}9 \cdot 10^3$	$14{,}35 \cdot 10^3$	$23{,}2 \cdot 10^3$	$15{,}4 \cdot 10^4$	$18{,}5 \cdot 10^4$
$\lvert z_{эл} \rvert_{max}$ *ОМ*	$1{,}54 \cdot 10^6$	$1{,}493 \cdot 10^6$	$31 \cdot 10^3$	$18{,}4 \cdot 10^3$	$161 \cdot 10^3$	$94{,}75 \cdot 10^3$	$26{,}4 \cdot 10^4$	$21{,}1 \cdot 10^4$
x_{min} *ОМ*	$-1{,}49 \cdot 10^6$	$-1{,}49 \cdot 10^6$	$5{,}17 \cdot 10^3$	$-2{,}01 \cdot 10^3$	$30{,}4 \cdot 10^3$	$-7{,}55 \cdot 10^3$	$-13 \cdot 10^4$	$-17{,}8 \cdot 10^4$
x_{max} *ОМ*	$-1{,}493 \cdot 10^6$	$-1{,}493 \cdot 10^6$	$-23 \cdot 10^3$	$-15{,}75 \cdot 10^3$	$-117{,}5 \cdot 10^3$	$-49{,}0 \cdot 10^3$	$-24 \cdot 10^4$	$-20{,}6 \cdot 10^4$
r_{max} *ОМ*	$191 \cdot 10^3$	$91 \cdot 10^3$	$28{,}5 \cdot 10^3$	$14{,}2 \cdot 10^3$	$150{,}1 \cdot 10^3$	$75{,}0 \cdot 10^3$	$138{,}0 \cdot 10^3$	$72{,}0 \cdot 10^3$
$\left.\frac{p}{i}\right\rvert_{max}$ *бар*/А	$53{,}6 \cdot 10^7$	$26{,}8 \cdot 10^7$	$20{,}7 \cdot 10^7$	$10{,}35 \cdot 10^7$	$47{,}5 \cdot 10^7$	$23{,}75 \cdot 10^7$	$45{,}7 \cdot 10^7$	$22{,}85 \cdot 10^7$
$\left.\frac{p}{E}\right\rvert_{max}$ *бар*/*в*	360	180	$18{,}7 \cdot 10^3$	$9{,}35 \cdot 10^3$	$10{,}0 \cdot 10^7$	$3{,}6 \cdot 10^3$	$22{,}8 \cdot 10^3$	$8{,}2 \cdot 10^3$
$\frac{z_{max}}{z_{min}}$	1,085	1,002	10,5	3,75	11,2	4,07	1,71	1,14
$\cos\varphi)_{max}$	0,128	0,066	1,0	0,971	1,0	0,986	0,65	0,36
$\cos\varphi$ на частоте, соответствующей $(p/i)_{max}$	0,128	0,066	0,960	0,840	0,950	0,850	0,56	0,33
$\cos\varphi$ на частоте, соответствующей $(p/E)_{max}$	0,128	0,066	0,99	0,830	0,99	0,880	0,60	0,35
xOM на частоте, соответствующей $kl=\pi$	$-1{,}48 \cdot 10^3$	$-1{,}48 \cdot 10^6$	$-8{,}8 \cdot 10^3$	$-8{,}8 \cdot 10^3$	$-43 \cdot 10^3$	$-43 \cdot 10^3$	$-19{,}6 \cdot 10^4$	$-19{,}6 \cdot 10^4$
Добротность $Q=\frac{1}{\delta}=\frac{f_0}{\Delta f}$	21	10,5	40	20	31,4	15,7	9	4,5

вода, благодаря малому волновому сопротивлению, является столь слабой нагрузкой, что в случае одностороннего излучения в воду есть область частот, в которой реактивная составляющая электрического импеданца излучателя должна иметь индуктивный характер. Следовательно, есть



Фиг. 3. Частотные зависимости активной и реактивной составляющих электрического импеданца и коэффициента мощности кварцевого излучателя при одностороннем излучении в воду

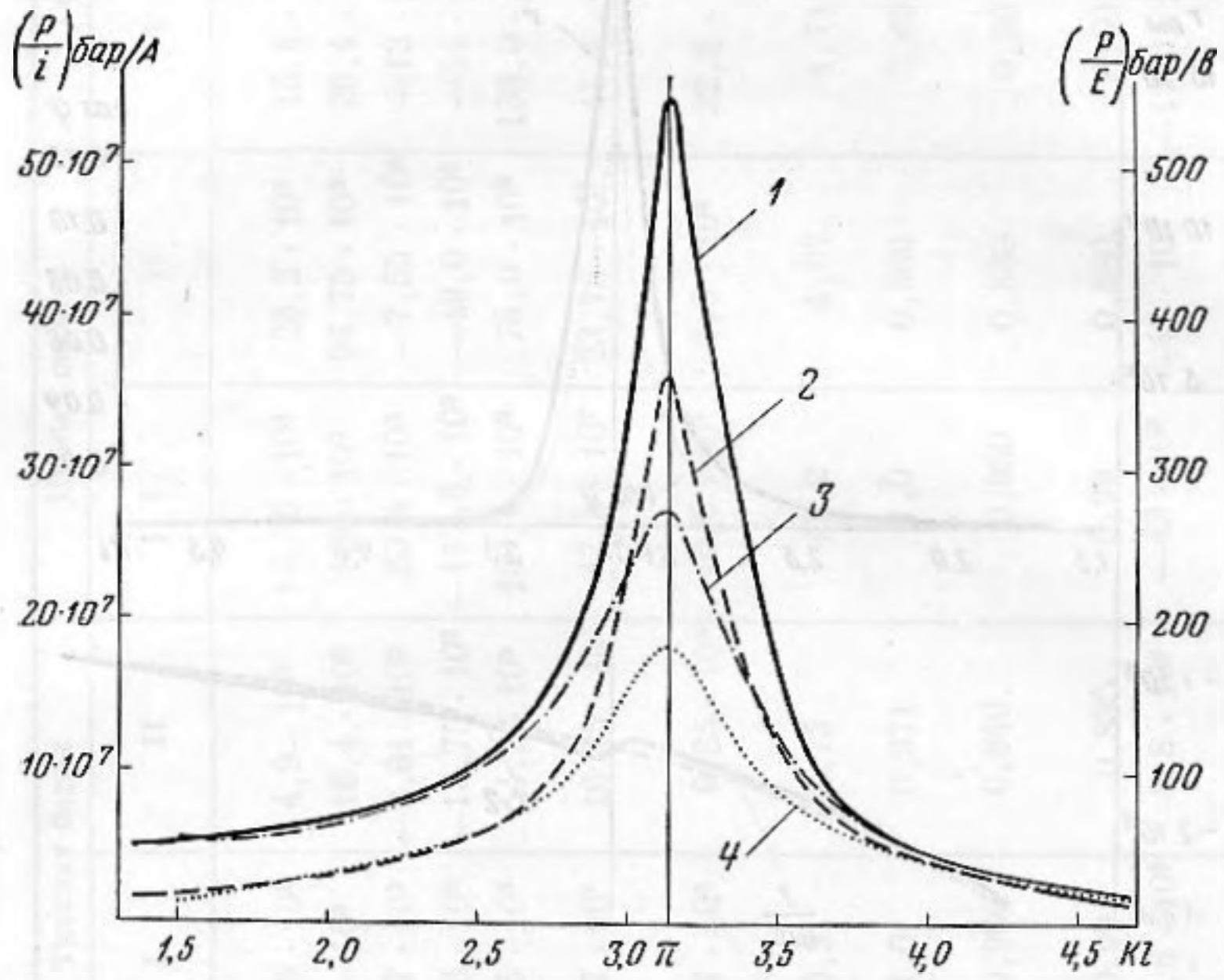


Фиг. 4. Частотные зависимости активной и реактивной составляющих электрического импеданца и коэффициента мощности при двустороннем излучении в воду

две частоты, при которых реактивная составляющая электрического импеданца равна нулю и излучатель при работе в воде представляет собой активную нагрузку для генератора. Коэффициент мощности на этих двух частотах равен 1. При двустороннем излучении в воду на одной из частот

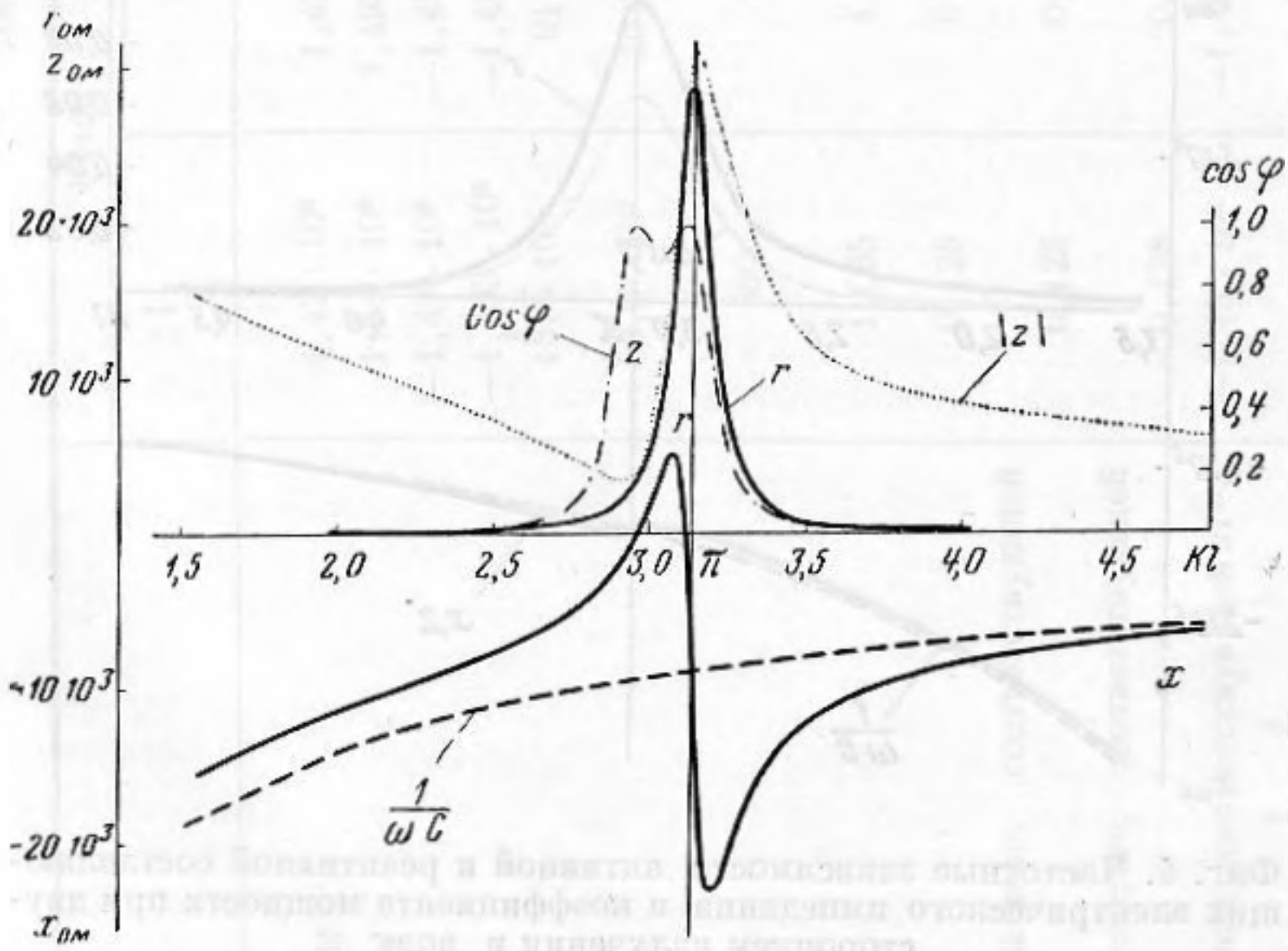
коэффициент мощности для керамики титаната бария (а также и для ниобата свинца) близок к единице.

Нам представляется целесообразным проводить сравнение различных пьезоматериалов между собой с точки зрения удобства применения их в излучателях именно по коэффициенту мощности, и наиболее экономичным режимом считать работу излучателя на частоте максимального зна-

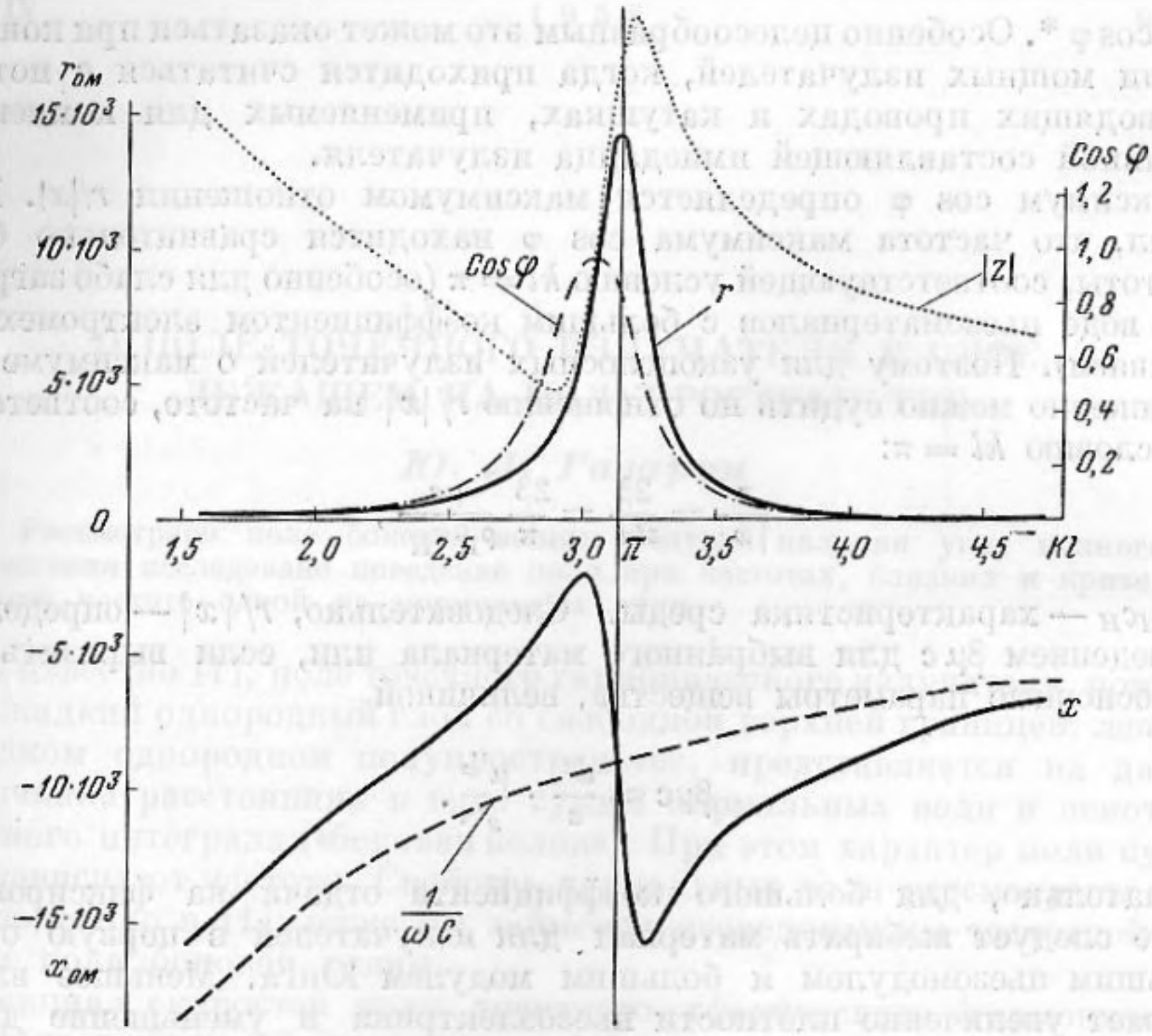


Фиг. 5. Частотные зависимости чувствительности по току и по напряжению для кварцевого излучателя при одностороннем и двустороннем излучении в воду:

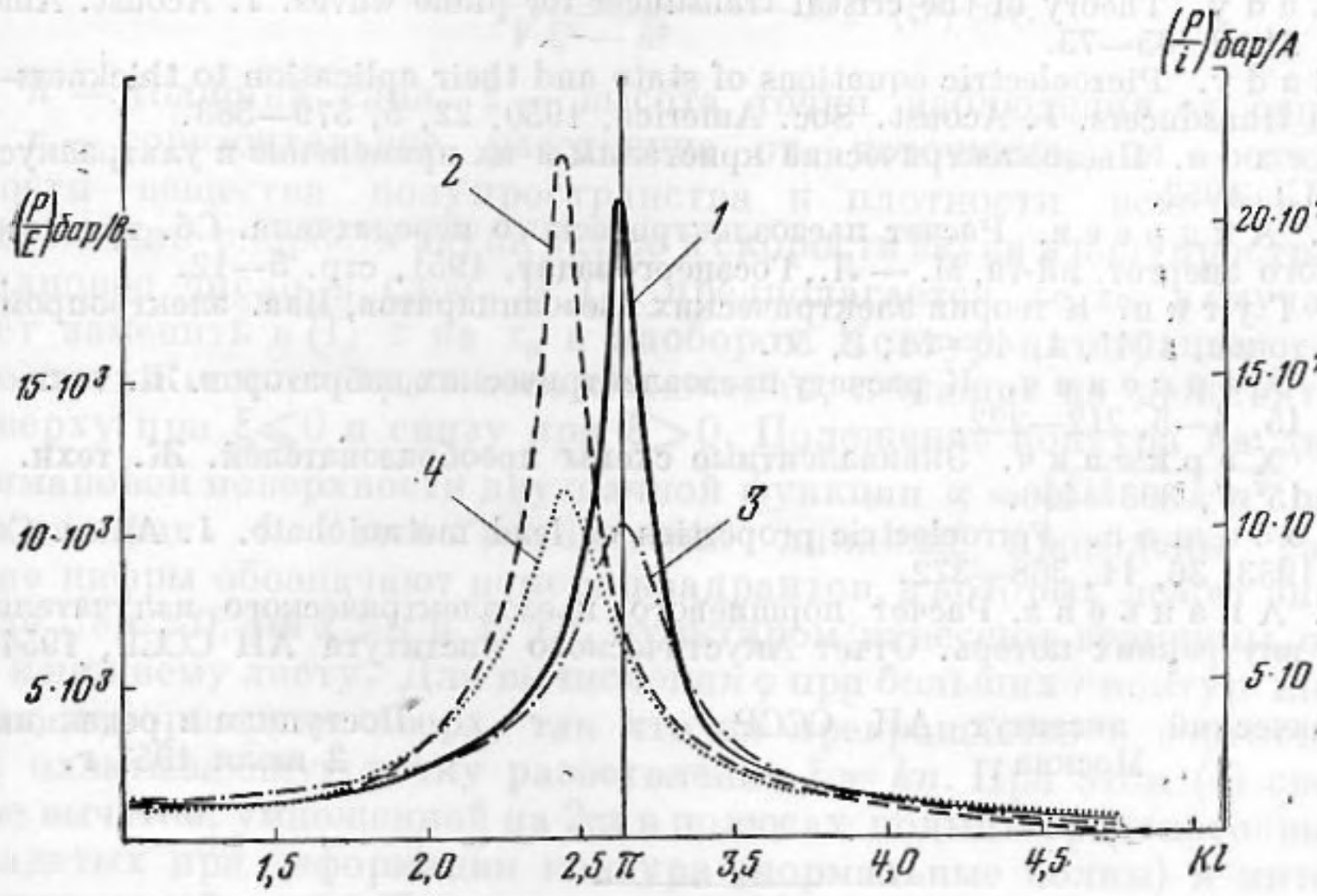
1 — (p/i) бар/А при одностороннем излучении, 2 — (p/E) бар/в при одностороннем излучении, 3 — (p/i) бар/А при двустороннем излучении, 4 — (p/E) бар/в при двустороннем излучении



Фиг. 6. Частотные зависимости модуля электрического импеданца, коэффициента мощности, активной и реактивной составляющих электрического импеданца для излучателя из керамики титаната бария при одностороннем излучении в воду



Фиг. 7. Частотные зависимости модуля электрического импеданца, коэффициента мощности, активной и реактивной составляющих электрического импеданца для излучателя из керамики титаната бария при двустороннем излучении в воду



Фиг. 8. Частотные зависимости чувствительности по току и по напряжению для излучателя из керамики титаната бария при одностороннем и двустороннем излучении в воду:

1—(*p*/*i*) *бар*/*А* при одностороннем излучении, *2* — (*p*/*E*) *бар*/*в* при одностороннем излучении, *3* — (*p*/*i*) *бар*/*А* при двустороннем излучении, *4* — (*p*/*E*) *бар*/*в* при двустороннем излучении

чения $\cos\varphi$ *. Особенно целесообразным это может оказаться при конструировании мощных излучателей, когда приходится считаться с потерями в подводящих проводах и катушках, применяемых для компенсации реактивной составляющей импеданца излучателя.

Максимум $\cos\varphi$ определяется максимумом отношения $r/|x|$. Расчет показал, что частота максимума $\cos\varphi$ находится сравнительно близко от частоты, соответствующей условию $kl = \pi$ (особенно для слабо загруженных в воде пьезоматериалов с большим коэффициентом электромеханической связи). Поэтому для узкополосных излучателей о максимуме $\cos\varphi$ приближенно можно судить по отношению $r/|x|$ на частоте, соответствующей условию $kl = \pi$:

$$\frac{r}{|x|} = \frac{2\beta}{zkl} = \frac{2\beta}{\pi}\frac{\mu c}{\rho_H c_H},$$

где $\rho_H c_H$ — характеристика среды. Следовательно, $r/|x|$ — определяется произведением $\beta\mu c$ для выбранного материала или, если выразить β и c через основные параметры вещества, величиной

$$\beta\mu c \approx \frac{d^2}{\varepsilon}\cdot\frac{\mu^{1/2}}{s^{3/2}}.$$

Следовательно, для большого коэффициента отдачи на фиксированной частоте следует выбирать материал для излучателей в первую очередь с большим пьезомодулем и большим модулем Юнга. Меньшее влияние оказывает увеличение плотности пьезоэлектрика и уменьшение диэлектрической проницаемости.

В заключение следует сказать, что все изложенное выше относится к строго поршневому излучателю (например, к хорошо подогнанной по частоте мозаике).

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Андреев. Равновесие и колебания пьезоэлектрического кристалла. Ж. прикладн. физ., 1928, 5, 3—4, 119—132.
2. W. Cady. Theory of the cristal transducer for plane waves. J. Acoust. America, 1949, **21**, 2, 65—73.
3. W. Cady. Piezoelectric equations of state and their aplication to thickness—vibration transducers. J. Acoust. Soc. America, 1950, **22**, 5, 579—583.
4. У. Мезон. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультраакустике. М., ИЛ, 1952.
5. Н. Н. Андреев. Расчет пьезоэлектрического передатчика. Сб. тр. Всесоюз. заочного энергет. ин-та, М. — Л., Госэнергоиздат, 1951, стр. 5—12.
6. Л. Я. Гутин. К теории электрических пьезоаппаратов, Изв. электропромышл. слаб. токов, 1941, **1**, 46—51; 2, 50.
7. А. А. Харкевич. К расчету пьезоэлектрических вибраторов. Ж. техн. физ., 1945, **15**, 4—5, 212—222.
8. А. А. Харкевич. Эквивалентные схемы преобразователей. Ж. техн. физ., 1945, **15**, 7, 393—406.
9. G. Goodman. Ferroelectric properties of lead metaniobate. J. Amer. Ceram. Soc., 1953, **36**, 11, 368—372.
10. А. А. Ананьева. Расчет поршневого пьезоэлектрического излучателя без учета внутренних потерь. Отчет Акустического института АН СССР, 1954 г.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
2 июля 1957 г.

* При учете внутренних потерь в материале пьезоэлектрика за критерий сравнения следует принять коэффициент отдачи, равный произведению коэффициента мощности на коэффициент полезного действия преобразователя.