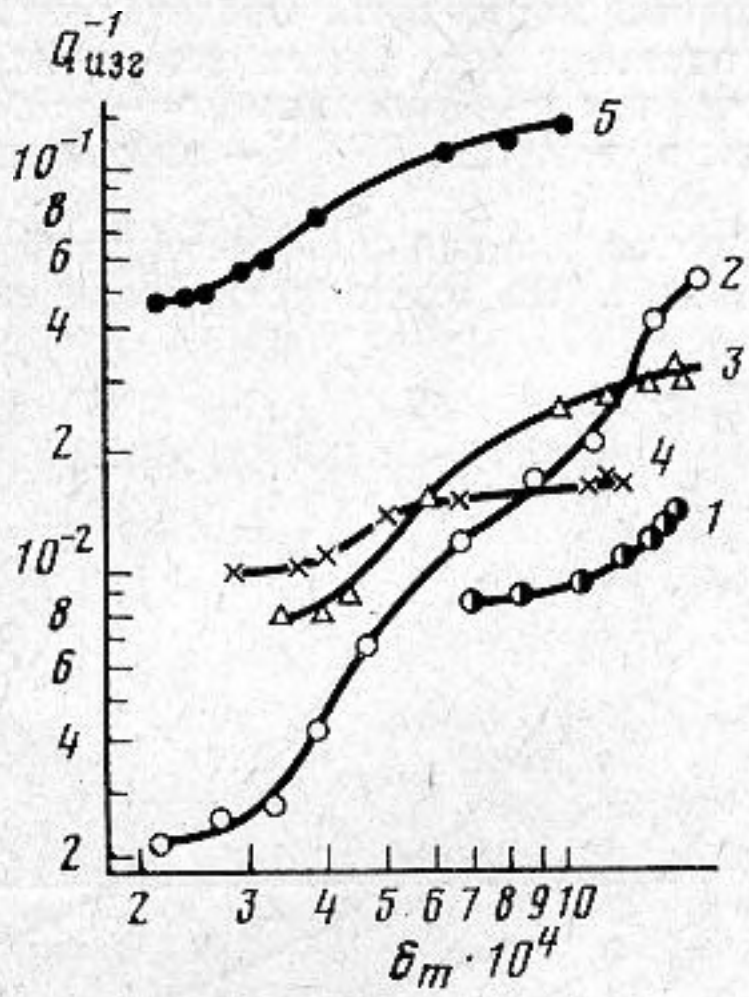
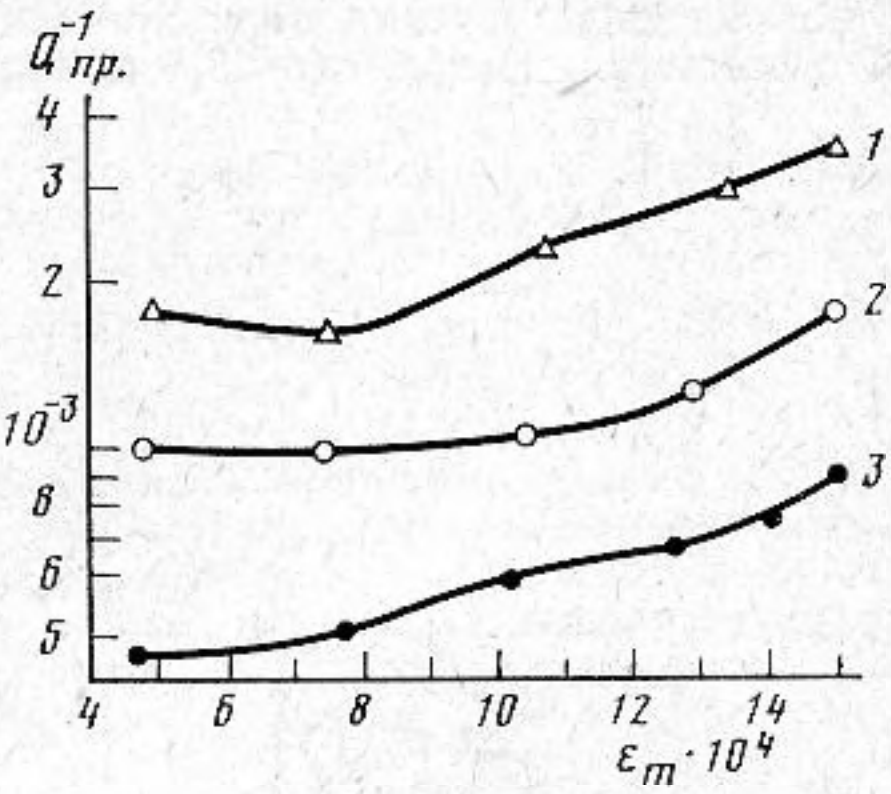
Таким образом, наименьшим поглощением ультразвука при продольных и изгибных колебаниях на низких ультразвуковых частотах (~20 кГц) с амплитудой деформации $>10^{-3}$ обладает титановый сплав типа ВТ-3-1, который и следует рекомендовать для использования при конструировании ультразвуковых колебатель-



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Зависимость коэффициента внутреннего трения от амплитуды изгибной деформации в титановых сплавах: *1* – сплав ВТ-3-1, *2* – ОТ-4-1, *3* – ВТ-20, *4* – ВТ-5-1, *5* – ВТ-8. Все сплавы отожженны

Фиг. 2. Зависимость коэффициента внутреннего трения от амплитуды деформации при продольных колебаниях в титановых сплавах: *1* – сплав ВТ-8 – отожженный, *2* – ВТ-3-1 – отожженный, *3* – ВТ-3-1 – деформированный

ных устройств различного типа. Небольшая пластическая деформация приводит к уменьшению значения Q^{-1} в титановых сплавах, и потому для повышения к.п.д. ультразвуковых устройств нужно использовать сплавы именно в деформированном состоянии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Цимбалистый Я. И.* Амплитудные зависимости рассеяния энергии при высокочастотном циклическом деформировании ферромагнитных и неферромагнитных материалов.– В кн.: Усталостная прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения. Киев. Наукова думка, 1977, с. 69–79.
2. *Кулемин А. В.* Поглощение мощного ультразвука в металлах и сплавах.– Акуст. ж., 1978, т. 24, № 6, с. 887–892.
3. *Кулемин А. В.* Внутренние потери в металлах при изгибных ультразвуковых колебаниях большой интенсивности.– Акуст. ж., 1979, т. 25, № 2, с. 258–264.
4. *Кулемин А. В.* Ультразвук и диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978.

Центральный научно-исследовательский
институт черной металлургии
им. И. П. Бардина

Поступила в редакцию
15.XI.1979

УДК 534.6.141

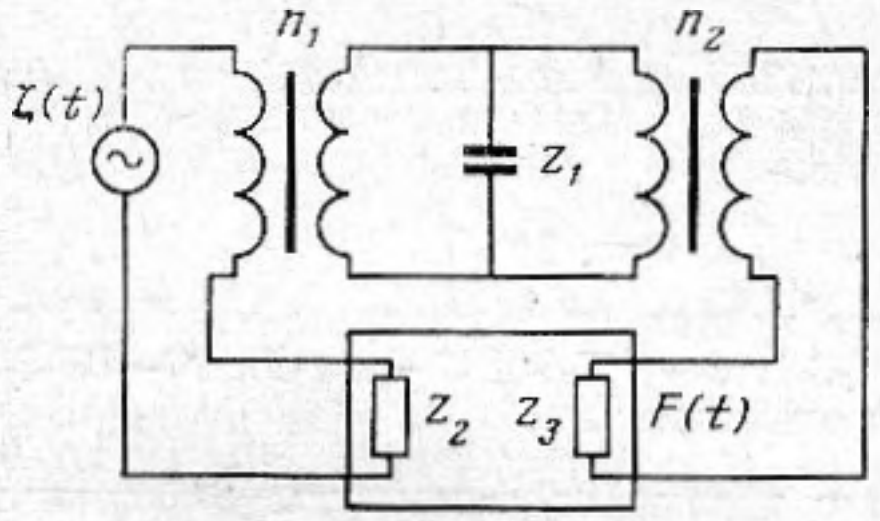
ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ПОЛОСТИ С ПОМОЩЬЮ МЕМБРАНЫ

Смердов А. А., Сторчун Е. В.

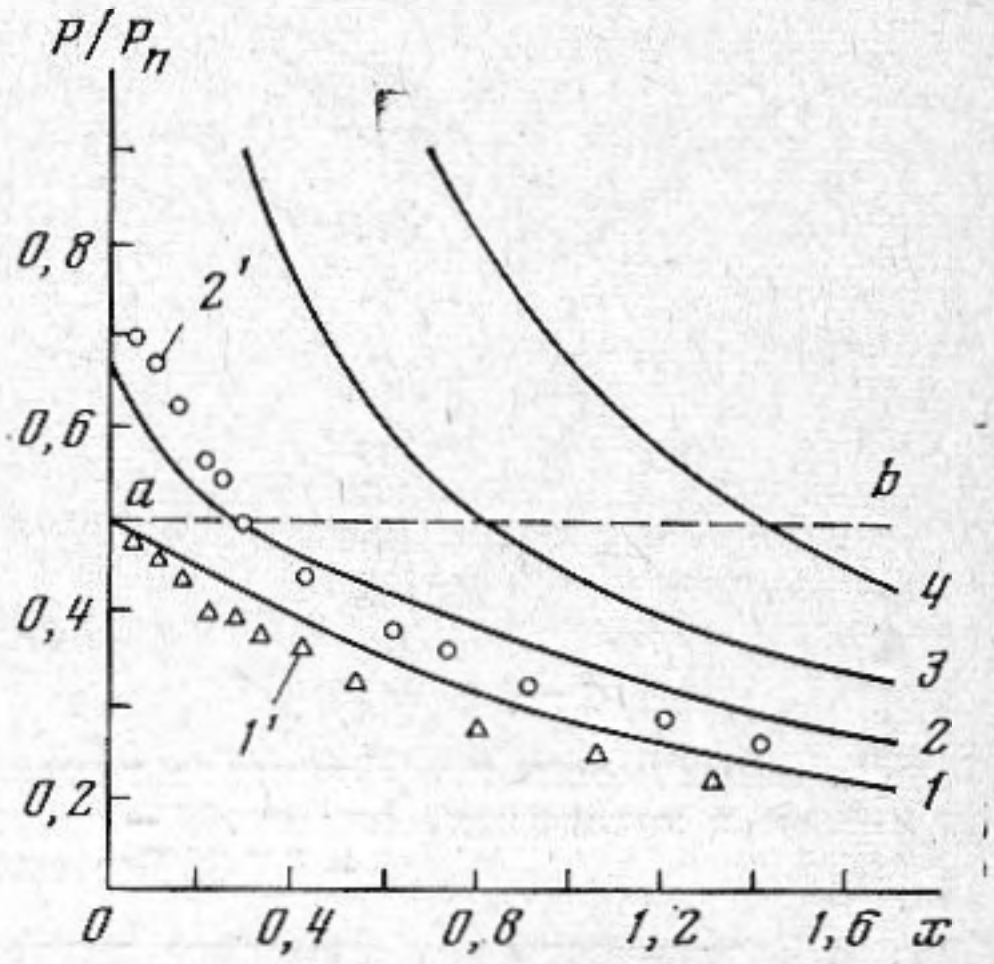
Кроме широко используемого способа возбуждения колебаний в полости посредством поршня [1, 2], распространение получило применение иного возбуждающего элемента – упругой мембраны, центральная часть которой выполняется жесткой (так называемая мембрана с жестким центром [3], медицинское приборостроение). При анализе такой конструкции амплитуду переменного давления в полости p естественно представить в виде суммы $p=p_1+p_2$, где p_1 – амплитуда давления, вызванного перемещением жесткого центра, p_2 – вклад в величину p, обусловлен-

ный движением мембранного полотна. Такое представление p связано с тем, что входное воздействие приложено к жесткому центру, задавая его перемещение, а p_2 зависит, с одной стороны, от этого перемещения, а с другой — от реакции на него полости p_1. В случае низкой частоты возбуждения и малых размеров полости, характерных для медицинских устройств, последние могут быть представлены колебательными системами с сосредоточенными параметрами, а импедансы их элементов — упругими составляющими. Тогда в линейном приближении $p=-\rho c^2 dV/V$; здесь ρ — плотность воздуха, c — скорость звука в воздухе, dV/V — относительное изменение объема полости.

Пусть площадь сечения цилиндрической полости, замыкаемой мембраной, равна S, а жесткого центра $\sigma(\sigma<S)$; длина полости l. На входе устройства задано



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Эквивалентная электрическая схема устройства $Z_1=S\rho c^2/i\omega l$; $Z_2=K_м/i\omega$; $Z_3=K_{мп}/i\omega$; $F(t)$ — сила, развиваемая мембранным полотном,

$$F(t)=\frac{1}{\alpha}K_{мп}\zeta(t)$$

Фиг. 2. Зависимость давления в полости от ее длины при заданном перемещении жесткого центра и δ, равных 0,2; 0,4; 0,6 и 0,8, соответствующих кривым *1—4*; *1'* — экспериментальная зависимость при $\delta=0{,}2$ и *2'* — при $\delta=0{,}4$. Штриховая линия соответствует положению $l_э$

перемещение жесткого центра $\zeta=\zeta_0\exp(i\omega t)$. В этом случае изменение объема полости dV_1, связанное с перемещением жесткого центра, равно

$$dV_1=\frac{K_{мп}l}{(S-\sigma)\rho c^2+K_{мп}l}\sigma\zeta_0\exp(i\omega t),$$

где $K_{мп}$ — жесткость мембранного полотна в отношении давления в полости, определяемая при неподвижном жестком центре согласно работе [4]. Величина p_1 запишется в виде

$$p_1=\rho c^2\frac{K_{мп}}{(S-\sigma)\rho c^2+K_{мп}l}\frac{\sigma}{S}\zeta_0. \quad (1)$$

В выражении (1) и далее движение внутрь полости считается отрицательным.

На площади мембранного полотна в общем случае задана сила, величина которой определяется его перемещением вслед за жестким центром и существующим давлением в полости p_1. Обозначив отношение амплитуд перемещений центра мембраны ζ_0 и вызванного им перемещения мембранного полотна $\zeta_п$ [2] через α, а также учитывая, что полотно является источником силы с внутренним импедансом $\frac{K_{мп}}{i\omega}\frac{S}{S-\sigma}$, величина p_2 может быть представлена как

$$p_2=\rho c^2\frac{K_{мп}}{(S-\sigma)\rho c^2+K_{мп}l}\left[\frac{1}{\alpha}\left(\frac{S}{\sigma}-1\right)-\frac{(S-\sigma)\rho c^2}{(S-\sigma)\rho c^2+K_{мп}l}\right]\frac{\sigma}{S}\zeta_0. \quad (2)$$

Окончательно для p получим

$$(3)\qquad p=\rho c^2\frac{K_{\text{мп}}}{(S-\sigma)\rho c^2+K_{\text{мп}}l}\left[\frac{K_{\text{мп}}l}{(S-\sigma)\rho c^2+K_{\text{мп}}l}+\frac{1}{\alpha}\left(\frac{S}{\sigma}-1\right)\right]\frac{\sigma}{S}\zeta_0.$$

Если $\sigma=S$, то $K_{\text{мп}}\to\infty$ (по определению), и из (3) получим $p=\rho c^2\zeta_0/l$, что соответствует поршневому возбуждению колебаний [1, 2].

Выражение (3) описывает величину p в цилиндрической полости при ее длине больше некоторого значения $l_э$ получаемого из условия равенства нулю зависимости (2), а именно

$$l_э=(S-\sigma)\rho c^2(1-\beta)\,/\,K_{\text{мп}}\beta,$$

где $\beta=(S/\sigma-1)/\alpha$. При $l<l_э$ давление в полости описывается выражением (1). В этом случае вклад мембранного полотна отсутствует. Это объясняет, почему экстремум (3) при $l_э=\dfrac{(S-\sigma)\rho c^2}{K_{\text{мп}}}\cdot\dfrac{1-\beta}{1+\beta}$ не имеет физического смысла, так как, очевидно, $l_э>l_э$.

Эквивалентная электрическая схема устройства по первой системе аналогий [5] приведена на фиг. 1. Мембрана на ней представлена в виде четырехполюсника, входной импеданс которого определяется жесткостью мембраны $K_м$ в отношении силы, приложенной к жесткому центру, а выходной – $K_{\text{мп}}$. Коэффициенты трансформации $n_1=\sigma/S$, $n_2=1-\sigma/S$ связаны с пересчетом величин на площадь сечения полости S. Из фиг. 1 легко получить выражение для входной жесткости устройства K_{00}

$$K_{00}=K_м+\frac{\sigma\rho c^2\cdot K_{\text{мп}}}{(S-\sigma)\rho c^2+K_{\text{мп}}l},$$

которая при $\sigma=S$ равна $K_{00}=S\rho c^2/l$ [2].

Графическая иллюстрация результатов исследования (1) и (3) при $p_п=\rho c^2\zeta_0/\zeta_0$, $l_0=S\rho c^2/K_{\text{мп}}$, $l=xl_0$, $\delta=\sigma/S$ и $\alpha=2$ [4] представлена на фиг. 2. Данные экспериментальной проверки этих зависимостей, приведенные на фиг. 2, соответствуют частным случаям $\delta_1=0{,}2$ и $\delta_2=0{,}4$, $l_{01}=(0{,}018-0{,}019)$ и $l_{02}=(0{,}018-0{,}028)$ м. В обоих случаях площадь сечения полости была равна $1{,}32\cdot10^{-3}$ м^2, а изменение l_0 связано с зависимостью $K_{\text{мп}}$ от давления при постоянном перемещении жесткого центра.

Полученные результаты свидетельствуют о разделе различных случаев рассматриваемого устройства линией ab на две группы. Первая из них соответствует $l<l_э$, и в ней импеданс мембраны $\dfrac{K_{\text{мп}}}{i\omega}\cdot\dfrac{S}{S-\sigma}$ играет роль шунта полости ($p_2=0$) во второй – движение мембранного полотна вносит свой вклад в величину p. Помимо этого давление в полости растет с увеличением δ, а область применимости выражения (1) при этом расширяется.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Харкевич А. А.* Примеры технических расчетов в области акустики. Л.: ВЭТА, 1938.
2. *Ржевкин С. Н.* Курс лекций по теории звука. Изд-во МГУ, 1960.
3. *Водяник В. И.* Эластичные мембраны. М.: Машиностроение, 1974.
4. *Нисневич М. З.* Расчет равновесного состояния плоской резиновой мембраны под нормальной нагрузкой.– Каучук и резина, 1972, № 2, с. 35–36.
5. *Белов А. И.* Составление электрических схем, эквивалентных механическим колебательным системам.– Ж. техн. физ., 1935, т. 5, № 9, с. 1545–1551.

Научно-производственное
объединение «РЭМА»

Поступила в редакцию
28.VI.1979
После исправления
25.VII.1980