

УДК 534.282

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВУКОПОГЛОТИТЕЛЯ, СИНТЕЗИРУЕМОГО НА ОСНОВЕ МЕХАНИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

© 1997 г. В. В. Тютюкин

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН

117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 02.11.96 г.

Представлены результаты модельной разработки гидроакустического поглотителя, создаваемого на основе механических резонаторов. Синтез поглотителя проводится для двух случаев: непрерывного и дискретного спектров резонаторов. Приведены результаты расчетов импедансов поглотителей для обоих случаев, а также частотные характеристики их коэффициентов отражения.

Одним из научных направлений современной акустики является разработка новых принципов и конструкций звукопоглощающих устройств, в том числе, для целей гидроакустики [1–4].

В настоящей работе проводится математическое моделирование одного из звукопоглотителей, который может быть использован, в первую очередь, для “загружения” стенок измерительных гидроакустических бассейнов. Основным отличием этого звукопоглотителя от известных является то, что он крепится к металлической стенке бассейна не со стороны падающих звуковых волн (т.е. в воде), а с тыльной стороны стенки (т.е. в воздухе). Такое расположение звукопоглотителя может иметь ряд очевидных преимуществ, в частности, легкий к нему доступ, отсутствие нежелательного воздействия воды и др.

Создание такого поглотителя можно осуществить применением не традиционных резиноподобных материалов с полостями (например, пористой резины) реагирующими на звуковое давление, а резонансных элементов (механических резонаторов), реагирующих на колебательную скорость стенки бассейна. Отсюда ясно, что чем ниже частота звуковых волн и чем тоньше металлическая стенка, тем проще осуществить такой поглотитель. В настоящей работе моделируется подобный поглотитель для стальной стенки толщиной несколько миллиметров в произвольном диапазоне частот.

В качестве резонаторов в рассматриваемой модели используются резонаторы типа “упругость–масса”, составленные из упругих резиновых столбиков малого сечения (кругового или квадратного) и массивных накладок той же площади. Такие резонаторы применялись в ряде работ, например, в качестве поглощающих элементов [5] или “антивибраторов” [6]. Эффект поглощения колебательной энергии такими резонаторами основан на значительных сдвиговых деформациях резинового столбика и большом коэффициенте

потерь резины при сдвиговых деформациях (от 0.1 до 1 для различных ее сортов). Кроме того, малый модуль сдвига (от 10^6 до 10^8 Па) позволяет реализовать весьма низкие резонансные частоты таких резонаторов.

Поскольку задачу синтеза звукопоглотителя и исследования его эффективности удобно описывать в терминах импедансов, приведем формулу для импеданса одиночного резонатора, колеблющегося под воздействием гармонической силы ($\exp(i\omega t)$):

$$z_0 = (1/i\omega m + i\omega/\bar{\psi})^{-1}. \quad (1)$$

Здесь ω – круговая частота, m – удельная масса накладки (на единицу поверхности), $\bar{\psi} = E(1 + i\eta)/d$ – удельная комплексная упругость резонатора, E – эффективный модуль упругости, η – коэффициент эффективных потерь, d – высота столбика. Выражение (1) можно записать, введя в рассмотрение комплексную резонансную частоту

$$\bar{\omega}_0 = (E(1 + i\eta)/md)^{1/2} = \omega_0 \sqrt{1 + i\eta}, \quad (2)$$

в другом виде:

$$z_0^m = r_0 + ix_0 = \frac{i\omega m \bar{\omega}_0^2}{\bar{\omega}_0^2 - \omega^2}. \quad (3)$$

Величину z_0 можно представить иначе, выразив ее через упругость резонатора:

$$z_0^\psi = \frac{i\omega \bar{\psi}}{\bar{\omega}_0^2 - \omega^2}. \quad (4)$$

Как показано в работе [5], величины $\bar{r} = \omega r_0$ и $\bar{x} = \omega x_0$ удовлетворяют уравнению окружности:

$$\bar{x}^2 + (\bar{r} - a)^2 = a^2,$$

проходящей через начало координат в плоскости \bar{r} , \bar{x} . Здесь $a = E\sqrt{1 + \eta^2}/2\eta d\omega_0$ – радиус окружно-

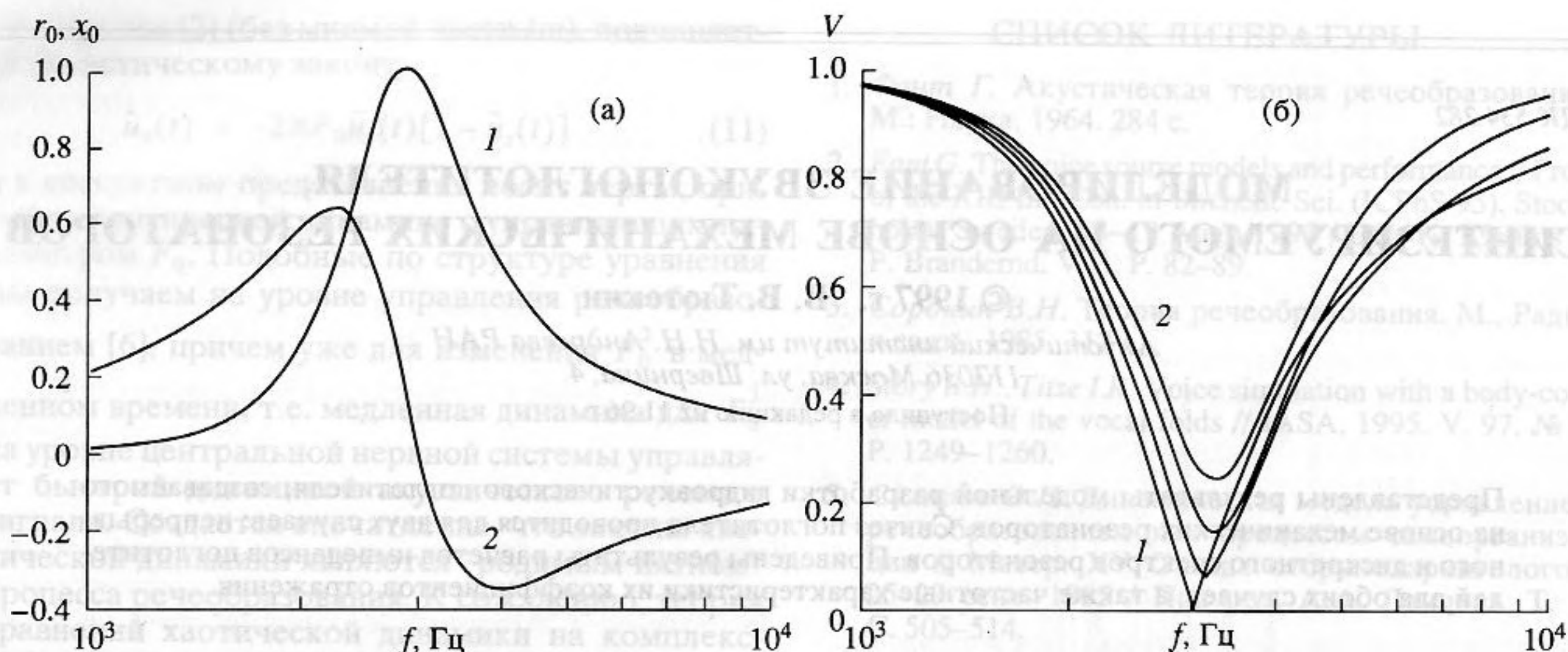


Рис. 1. а – импеданс резонатора; 1 – действительная часть, 2 – мнимая часть; б – коэффициент отражения одиночного резонатора при толщине стенки: 1 – 0 см, 2 – 0.6 см.

сти. Поскольку величины E и η , являющиеся некоторыми эффективными значениями модуля упругости и коэффициента потерь резинового столбика, не могут быть аналитически выражены через известные комплексные коэффициенты Лямэ резины и геометрические размеры столбика, их можно определить экспериментально, измерив величины $r(\omega)$ и $x(\omega)$ и используя выражения для ω_0 и a .

При креплении резонаторов к тыльной стороне стенки общий импеданс

$$Z = i\omega M + Z_0, \quad (5)$$

где M – удельная масса стенки, Z_0 – удельный суммарный импеданс резонаторов (3) или (4) с различными комплексными резонансными частотами $\bar{\omega}_0^2$.

Коэффициент отражения звуковой волны, нормально падающей на стенку, определяется формулой: $V = z - 1/z + 1$, где $z = Z/(\rho c)_0$, а $(\rho c)_0$ – волновое сопротивление воды. Для того, чтобы величина $|V|$ была близка к нулю, необходимо, чтобы $r \approx 1$ и $x \approx 0$ на каждой частоте рассматриваемого диапазона частот.

На рис. 1а в качестве примера приведены графики величин действительной r_0 и мнимой x_0 частей импеданса (3) одиночного резонатора с резонансной частотой около 3 кГц. Частотные характеристики этих величин имеют обычный “резонансный” вид: величина r имеет максимум, равный $\omega_0 m / \eta$, величина x до резонанса носит инерционный характер, после резонанса – упругий. Общая нормировка выбрана так, что $r(\omega_0)/(\rho c)_0 = 1$. Расчет сделан для величины $\eta = 0.6$. Ширина полосы $\Delta\omega/\omega$ по критерию $r = 0.5$ составляет около 0.6.

На рис. 1б (кривая 1) приведена частотная характеристика коэффициента отражения этого резонатора; другие кривые соответствуют случаю учета стальной стенки толщиной от 2 до 6 мм. Если в первом случае на резонансной частоте можно осуществить полное поглощение звука, то в остальных это сделать не удастся.

Высокую эффективность звукопоглотителя в широкой полосе частот можно получить только применением резонаторов с различными резонансными частотами.

Вначале с целью оценки предельных возможностей в задаче синтеза поглотителя рассмотрим непрерывный спектр резонансных частот. В этом случае суммарный удельный импеданс резонаторов $z_0(\omega) = Z_0/(\rho c)_0$ может быть представлен в виде интеграла:

$$z_0(\omega) = \int_{\omega_{01}}^{\omega_{02}} s(\omega_0) z_0^{m,\psi}(\omega, \omega_0) d\omega_0, \quad (6)$$

где $z_0^{m,\psi}(\omega, \omega_0)$ определяется формулой (3) или (4), $s(\omega_0) \geq 0$ – произвольная функция, причем величина $s(\omega_0)d\omega_0$ по физическому смыслу представляет собой относительную площадь, занятую резонаторами с частотами от ω_0 до $\omega_0 + \Delta\omega_0$. Исходя из этого, на $s(\omega_0)$ должно быть наложено дополнительное условие:

$$\int_{\omega_{01}}^{\omega_{02}} s(\omega_0) d\omega_0 \leq 1. \quad (7)$$

Предполагается, что все резонаторы распределены по поверхности достаточно равномерно, так

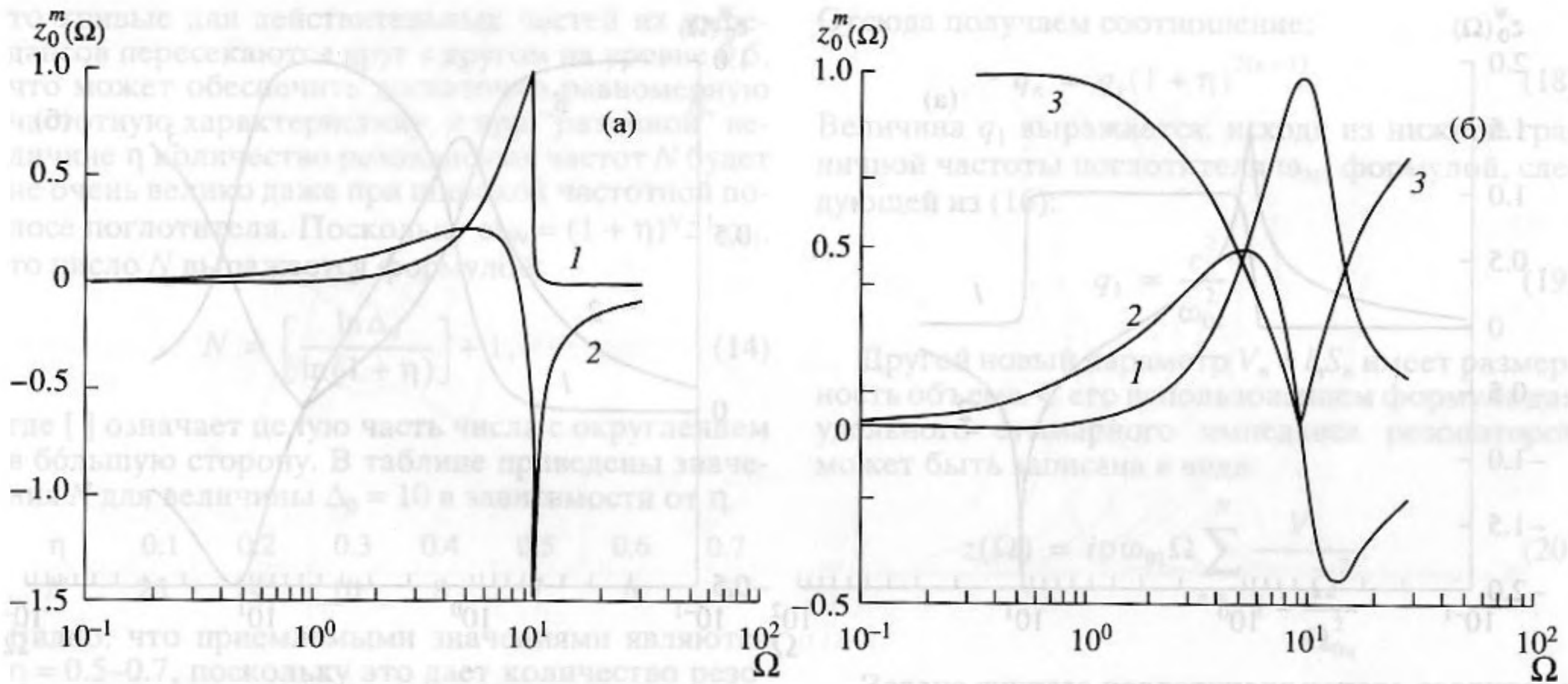


Рис. 2. а – частотная зависимость импеданса $z_0^m(\Omega)$ при $\eta = 0.01$; 1 – действительная часть, 2 – мнимая часть; б – то же при $\eta = 0.6$; 1 – действительная часть, 2 – мнимая часть, 3 – коэффициент отражения.

что величиной $z_0(\omega)$ можно характеризовать локальный импеданс стенки. Частоты ω_{01} и ω_{02} – границы диапазона используемых резонансных частот. В дальнейшем мы будем использовать безразмерные частоты:

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_{01}}, \quad \bar{\Omega} = \frac{\Omega}{\sqrt{1-i\eta}},$$

$$\Omega_0 = \frac{\omega_0}{\omega_{01}}, \quad \Delta_0 = \frac{\omega_{02}}{\omega_{01}}.$$

В этих обозначениях выражение (6) можно записать в виде:

$$z_0(\Omega) = \int_1^{\Delta_0} s(\omega_0) z_0^{m,\psi}(\Omega, \Omega_0) d\Omega_0, \quad (8)$$

где выражения для $z_0(\Omega, \Omega_0)$ имеют вид:

$$z_0^m(\Omega, \Omega_0) = \frac{i\Omega m \omega_{01} \Omega_0^2}{\Omega_0^2 - \bar{\Omega}^2}, \quad (3')$$

$$z_0^\psi(\Omega, \Omega_0) = \frac{i\Omega \psi_0 \omega_{01}^{-1}}{\Omega_0^2 - \bar{\Omega}^2}. \quad (4')$$

Рассмотрим вначале случай с постоянным значением функции $s(\Omega_0) = s_0 = \text{const}$. Физически резонансные частоты можно изменять путем изменения либо упругости прокладок (модуля сдвига и толщины), либо массы накладок, либо того и другого вместе. В первом случае в интеграл (8) необ-

ходимо подставить величину $z_0^m(\Omega, \Omega_0)$ из (3'), во втором – $z_0^\psi(\Omega, \Omega_0)$ из (4'). В результате интегрирования получим

$$z_0^m(\Omega) = iX_m(\Omega)(1 + F(\bar{\Omega})), \quad (9)$$

$$z_0^\psi(\Omega) = i\bar{X}_\psi(\Omega)F(\bar{\Omega}). \quad (10)$$

Здесь $X_m(\Omega) = m\omega_{01}\Omega s_0$ – инерционный и $\bar{X}_\psi(\Omega) = \bar{\psi}(\omega_{01}\Omega)^{-1}s_0$ – упругий (комплексный) импедансы резонаторов. Функция $F(\bar{\Omega})$ имеет вид:

$$F(\bar{\Omega}) = \frac{\bar{\Omega}}{2} \ln \frac{(\Delta_0 - \bar{\Omega})(1 + \bar{\Omega})}{(\Delta_0 + \bar{\Omega})(1 - \bar{\Omega})}. \quad (11)$$

Нетрудно убедиться, что при $\Delta_0 \rightarrow 1$ выражения (9) и (10) переходят в формулы (3') и (4') соответственно и описывают импедансы одиночного резонатора с резонансной частотой ω_{01} .

Графически величины $z_0^m(\Omega)$ и $z_0^\psi(\Omega)$ представлены на рис. 2 и 3 в виде зависимости их действительной и мнимой частей от безразмерной частоты Ω . При этом величины $X_m(\Omega)$ и $\bar{X}_\psi(\Omega)$ нормированы на волновое сопротивление воды, а величина $\Delta_0 = 10$. Значения Ω существенно превосходят изменения величин Ω_0 (от 1 до 10). Величина s_0 выбиралась из условия близости к единице максимального значения действительной части импеданса.

Рис. 2а и 3а соответствуют предельно малому значению коэффициента потерь $\eta = 0.01$, позво-

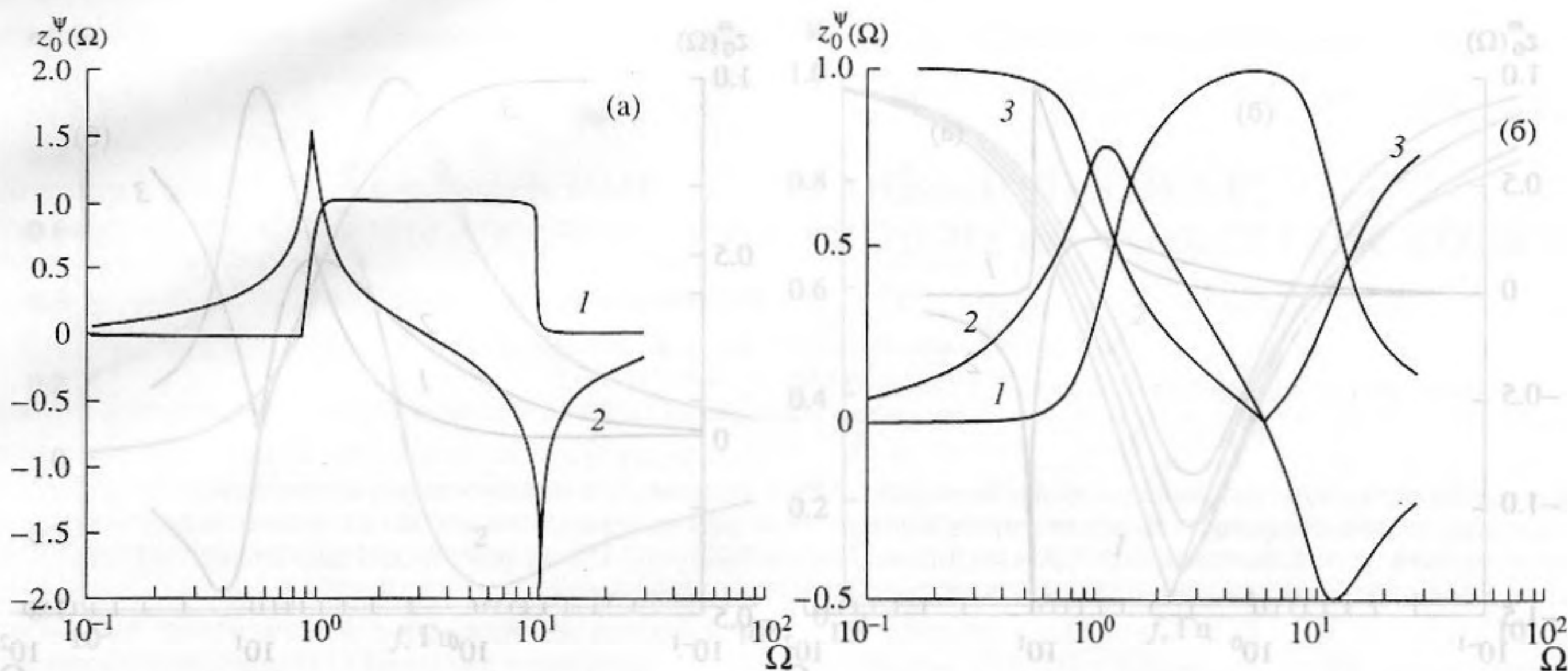


Рис. 3. а – частотная зависимость импеданса $z_0^\Psi(\Omega)$ при $\eta = 0.01$, 1 – действительная часть, 2 – мнимая часть; б – то же при $\eta = 0.6$, 1 – действительная часть, 2 – мнимая часть, 3 – коэффициент отражения.

ляющему определить характерные особенности соответствующих импедансов. Из этих рисунков видно, что действительная и мнимая части $z_0^m(\Omega)$ имеют экстремальные значения при $\Omega = 10$, т.е. на высшей частоте спектра резонансных частот Ω_0 . В то же время действительная часть $z_0^\Psi(\Omega)$ равна единице во всей полосе, соответствующей спектру резонансных частот. При этом мнимая часть $z_0^\Psi(\Omega)$ имеет максимум при $\Omega = 1$ и минимум при $\Omega = 10$, т.е. на краях этой полосы. Эта величина обращается в ноль, т.е. система имеет резонанс, при $\Omega_p \approx 0.31$, т.е. $\Omega_p \approx \sqrt{\Delta_0}$.

На рис. 2б и 3б представлены те же величины для значения $\eta = 0.6$, соответствующего реальным величинам коэффициента сдвиговых потерь резины. Из рисунков видно, что в этом случае характеристики импедансов несколько искажаются; при этом $z_0^m(\Omega)$ соответствует импедансу обычного резонатора с относительной шириной полосы 0.75, а $z_0^\Psi(\Omega)$ представляет собой импеданс резонатора с очень широкой полосой, равной 1.8.

На этих же рисунках представлены значения модуля коэффициента отражения звука от этих конструкций (без учета стенки). Видно, что для $z_0^\Psi(\Omega)$ коэффициент отражения во всей полосе частот Ω от 1 до 10 не превышает величины 0.5, обращаясь в ноль на резонансной частоте, как и в случае одиночного резонатора. Для случая $z_0^m(\Omega)$

ширина полосы эффективного поглощения звука значительно меньше.

Практически осуществить звукопоглотитель с непрерывным спектром резонансных частот не представляется возможным. Поэтому для этой цели можно использовать только дискретный спектр, т.е. набор резонаторов с различными резонансными частотами, отстоящими друг от друга на конечную величину и имеющими свои относительные площади S , которые могут быть записаны в виде $S(\Omega_0) = s(\Omega_0)\delta(\Omega_0 - \Omega_{0n})$. Здесь n – номер резонатора, Ω_{0n} – его резонансная частота. Формула (8) в этом случае будет иметь вид:

$$z_0(\Omega) = \int_1^{\Delta_0} s(\Omega_0)\delta(\Omega_0 - \Omega_{0n})z_0^{m,\Psi}(\Omega, \Omega_0)d\Omega_0 = \sum_{n=1}^N S(\Omega_{0n})z_0^{m,\Psi}(\Omega, \Omega_{0n}). \quad (12)$$

Таким образом, импеданс поглотителя является суммой импедансов отдельных резонаторов с неизвестными пока относительными площадями. Решение вопроса о количестве типов резонаторов (числе резонансных частот) и площадях, занимаемых ими, не является однозначным и в существенной мере зависит от коэффициента потерь резины, определяющего ширину полосы резонаторов. Если соседние резонансные частоты связаны соотношением:

$$\omega_{0n} = (1 + \eta)\omega_{0(n-1)}, \quad (13)$$

то кривые для действительных частей их импедансов пересекаются друг с другом на уровне 0.5, что может обеспечить достаточно равномерную частотную характеристику, и при "разумной" величине η количество резонансных частот N будет не очень велико даже при широкой частотной полосе поглотителя. Поскольку $\omega_{0N} = (1 + \eta)^{N-1} \omega_{01}$, то число N выражается формулой:

$$N = \left[\frac{\ln \Delta_0}{\ln(1 + \eta)} \right] + 1, \quad (14)$$

где $[]$ означает целую часть числа с округлением в большую сторону. В таблице приведены значения N для величины $\Delta_0 = 10$ в зависимости от η

η	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
N	25	14	10	8	7	6	6

Видно, что приемлемыми значениями являются $\eta = 0.5-0.7$, поскольку это дает количество резонансных частот 6-7. В дальнейшем мы использовали величину $\eta = 0.6$.

Важнейшим фактором, как и прежде, остается способ изменения резонансных частот - либо за счет массы накладок, либо за счет изменения толщины прокладок. При решении этого вопроса необходимо иметь в виду, что при увеличении резонансной частоты в 10 раз ($\Delta_0 = 10$) необходимо уменьшить эти параметры в 100 раз, что невозможно сделать в рамках рассматриваемой модели резонатора. Поэтому резонансную частоту целесообразно изменять, подбирая совместно оба эти параметра.

Как уже говорилось выше, еще одним важным параметром, определяющим вклад данного резонатора в звукопоглощение всего поглотителя, является относительная площадь S , занимаемая им на стенке. Эти три величины m , d , S могут быть объединены в два новых параметра, которые и нужно будет определить в ходе синтеза поглотителя.

С этой целью представим резонансную частоту ω_{0n} в виде:

$$\omega_{0n}^2 = \frac{E}{\rho l_n d_n} = \frac{c^2}{q_n}, \quad (15)$$

где ρ - плотность материала накладки, l_n - ее толщина, d_n - толщина прокладки, c^2 - константа, имеющая размерность квадрата скорости, $q_n = l_n d_n$ - новый параметр, имеющий размерность площади. Для безразмерной резонансной частоты Ω_{0n}^2 будем иметь

$$\Omega_{0n}^2 = \frac{\omega_{0n}^2}{\omega_{01}^2} = \frac{q_1}{q_n}. \quad (16)$$

С другой стороны, будем иметь

$$\Omega_{0n}^2 = (1 + \eta)^{2(n-1)}. \quad (17)$$

Отсюда получаем соотношение:

$$q_n = q_1 (1 + \eta)^{2(n-1)}. \quad (18)$$

Величина q_1 выражается, исходя из нижней граничной частоты поглотителя ω_{01} , формулой, следующей из (16):

$$q_1 = \frac{c^2}{\omega_{01}^2}. \quad (19)$$

Другой новый параметр $V_n = l_n S_n$ имеет размерность объема. С его использованием формула для удельного суммарного импеданса резонаторов может быть записана в виде:

$$z(\Omega) = i\rho\omega_{01}\Omega \sum_{n=1}^N \frac{V_n}{1 - \frac{\Omega^2}{\Omega_{0n}^2}}. \quad (20)$$

Задача синтеза поглотителя теперь сводится к подбору параметров V_n , обеспечивающих достаточно малый коэффициент отражения. Как и выше, будем считать, что это хорошо выполняется, если $\text{Re} z(\Omega) \approx 1$ в заданном диапазоне частот.

Параметры q_n и V_n связывают между собой величины l_n , d_n и S_n , т.е. существует некоторый произвол в выборе последних, который позволяет сократить диапазон изменения l_n и d_n , так чтобы условия для выбранной модели резонатора выполнялись. С другой стороны, должно выполняться условие:

$$\sum_{n=1}^N S_n \leq 1. \quad (21)$$

Некоторые трудности могут возникнуть при создании поглотителя на очень широкий диапазон частот (например, более 1 декады). В этом случае целесообразно разбиение полосы частот на два (или более) поддиапазона с использованием резины двух (или более) сортов: в нижнем поддиапазоне можно применить резину с меньшим модулем сдвига, в верхнем - с большим. В этом случае можно добиться того, что величины l_n , d_n и S_n всегда будут соответствовать вышеприведенным условиям, в том числе, условию (21).

На последующих рисунках приведены результаты синтеза поглотителя, выполненного в соответствии с вышеизложенным. При этом величины V_n подбирались методом численного моделирования с использованием графических файлов системы Matlab. Эта система позволяет проводить расчеты с комплексными числами (без разделения последних в исходных формулах на действительную и мнимую части) и выводить результаты на экран дисплея в виде графиков. В соответствии с этим выполнялись расчеты $z(\Omega)$ по формуле (20), результаты выводились на экран, а затем варьированием величин V_n добивались условия $\text{Re} z(\Omega_{0n}) \approx 1$ во всем диапазоне частот. Расчеты

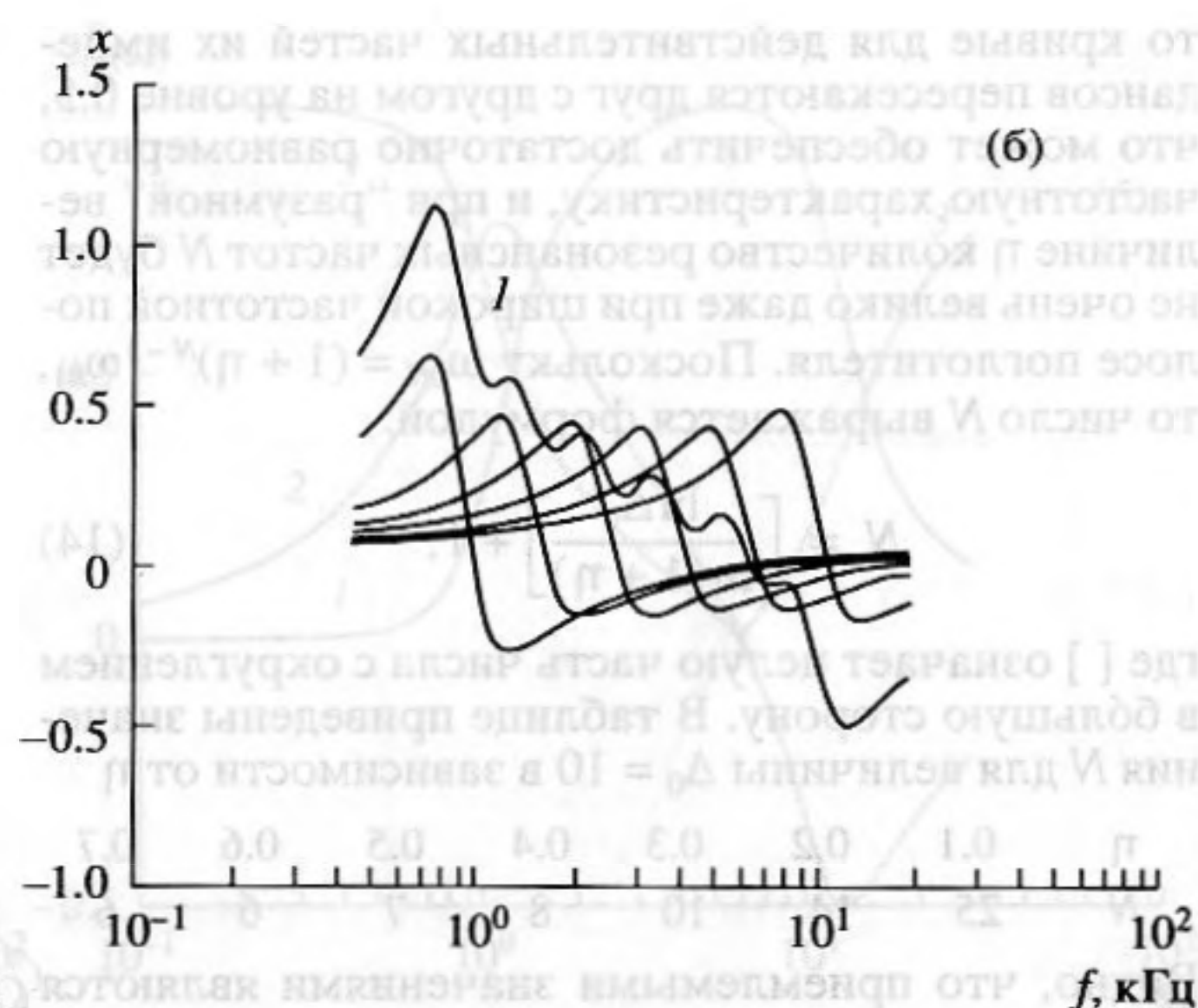
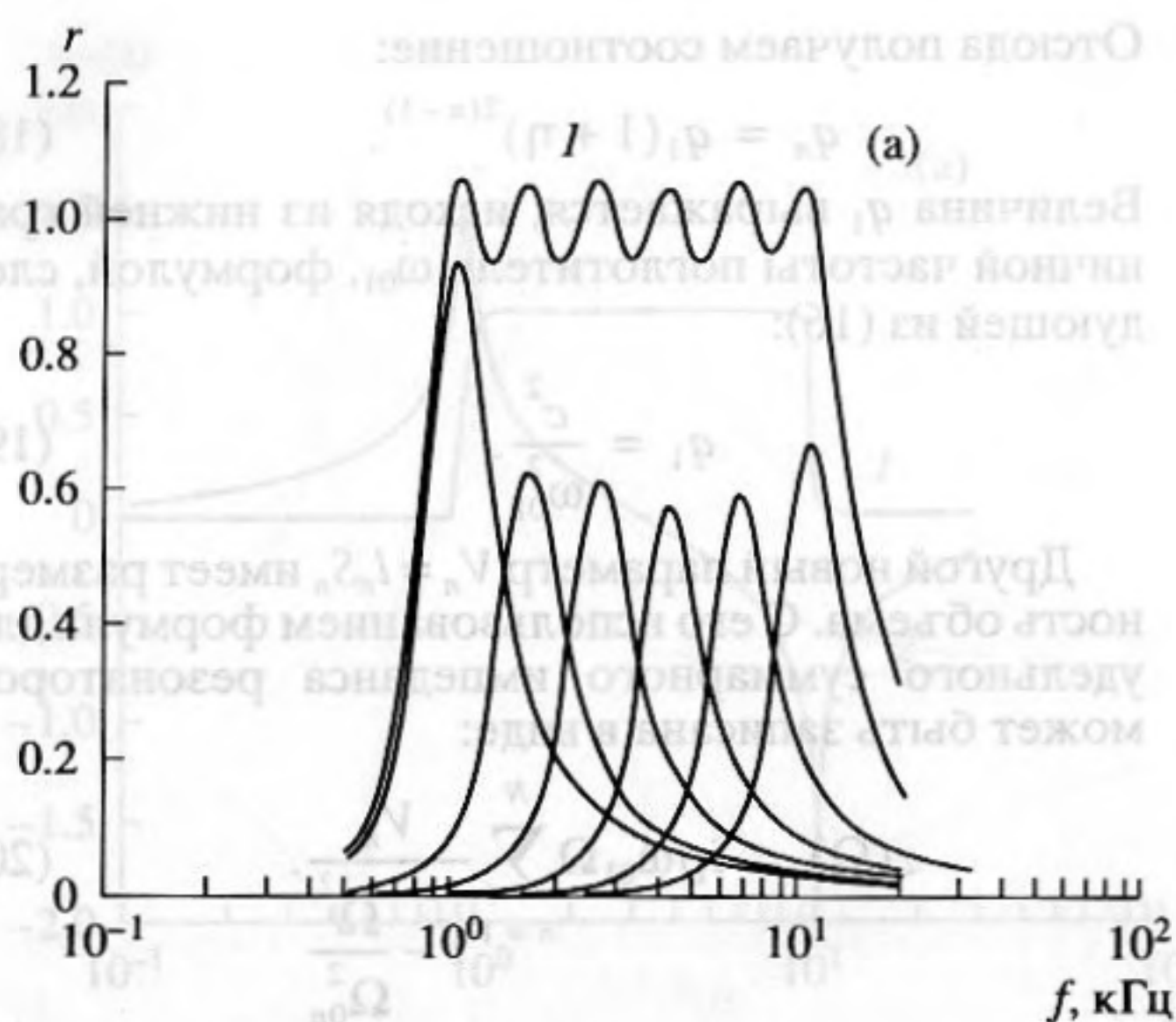


Рис. 4. а – действительная часть импеданса резонаторов, I – суммарная величина; б – мнимая часть импеданса резонаторов, I – суммарная величина.

проводились для значений $\Delta_0 = 10$, $\eta = 0.6$, $N = 6$ (в соответствии с таблицей).

Суммарный импеданс поглотителя со стенкой можно записать в виде:

$$z(\Omega) = i\omega_{01}\Omega \left(M + \rho \sum_{n=1}^N \frac{V_n}{1 - \frac{\Omega^2}{\Omega_{0n}^2}} \right). \quad (22)$$

Результаты расчетов представлены на рис. 4а для действительной и рис. 4б для мнимой частей

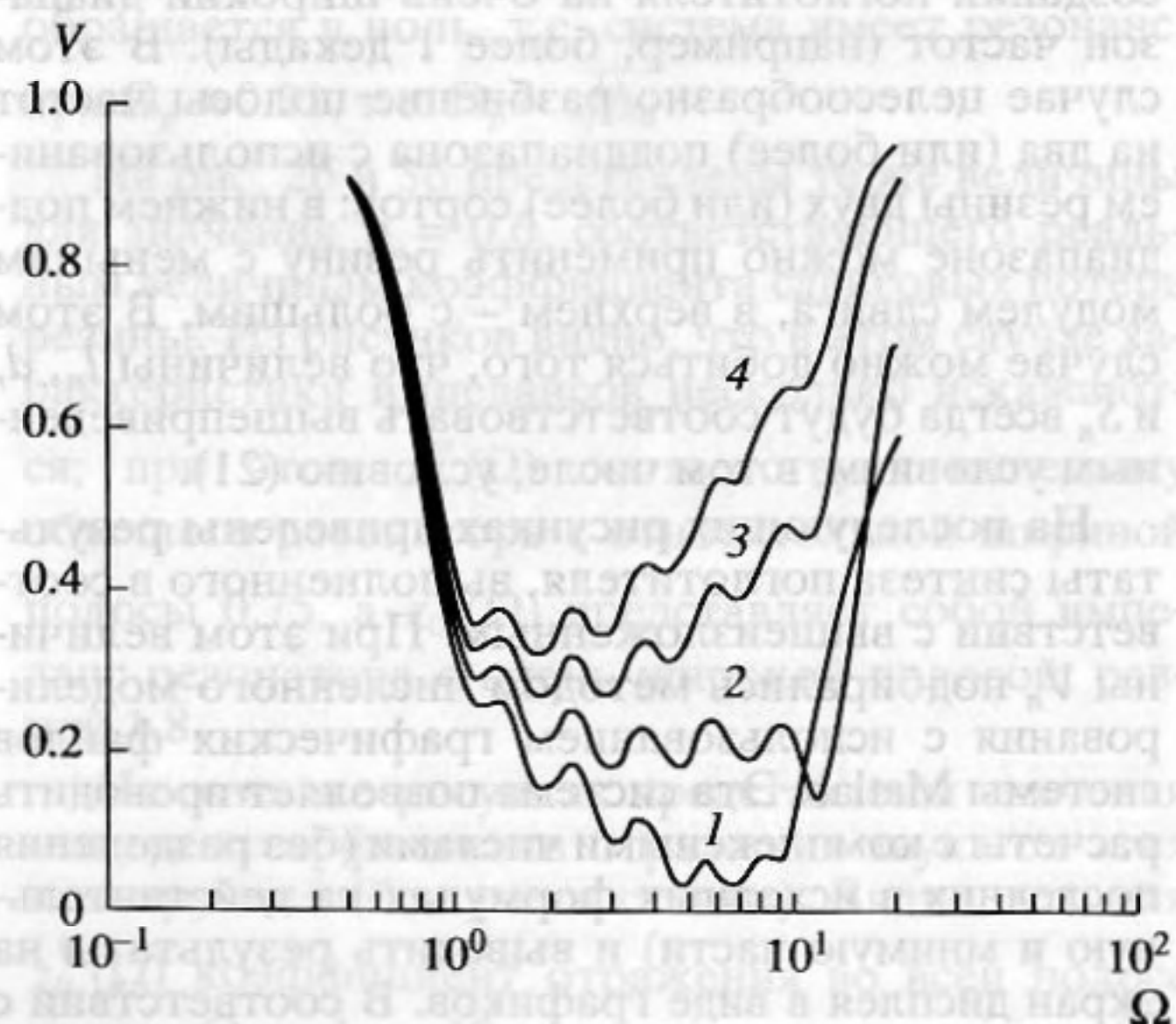


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента отражения поглотителя. Значение $\Omega = 1$ соответствует частоте 1000 Гц; 1 – 0 см, 2 – 0.2 см, 3 – 0.4 см, 4 – 0.6 см.

$z_n(\Omega)$. На этих рисунках приведены как импедансы отдельных резонаторов, так и их суммарное значение. Величины $\text{Re}z(\Omega_{0n})$ (в максимуме каждой резонансной кривой) пропорциональны величинам V_n , суммарное значение имеет “периодический” характер со средним значением 1. Сравнение рис. 4 с рис. 3 показывает, что такой метод синтеза поглотителя по своим результатам (как для действительной, так и для мнимой частей импеданса) близок к результатам синтеза с применением непрерывного спектра резонансных частот при использовании величины $z_0^\Psi(\Omega, \Omega_0)$ и постоянного значения $s(\Omega_0)$. Отличием является некоторая “изрезанность” кривых, обусловленная дискретностью спектра резонансных частот.

Эффективность разработанной конструкции поглотителя (рис. 4), нанесенного на стенку гидроакустического бассейна, представлена на рис. 5 в виде частотной зависимости модуля коэффициента отражения для стенки толщины 0, 2, 4 и 6 мм. При этом величина $\Omega = 1$ соответствует частоте 1 кГц. Видно, что с увеличением толщины стенки эффективность поглотителя в среднем снижается, что объясняется, прежде всего, большой величиной мнимой части суммарного импеданса.

Рассмотрим далее вопрос о “пересчете” полученных результатов при изменении нижней граничной частоты диапазона. Будем предполагать, что величины Δ_0 и η остаются прежними, т.е. сохраняется значение N (в данном случае $N = 6$), а новая величина нижней граничной частоты ω'_{01} связана с прежним ее значением соотношением: $\omega'_{01} = \alpha \omega_{01}$, где α – коэффициент подобия. Тогда

параметры q_n поглотителя должны быть изменены в соответствии с формулами (18) и (19):

$$q'_n = \alpha^2 q_n. \quad (23)$$

Из условия $\omega_{01} V_n = \omega'_{01} V'_n$, следующего из формулы (21), имеем

$$V'_n = \alpha V_n. \quad (24)$$

Формула (23) для суммарного импеданса примет вид:

$$z(\Omega) = i\omega'_{01} \Omega \left(M + \rho \sum_{n=1}^N \frac{V'_n}{1 - \frac{\Omega^2}{\Omega_{0n}^2}} \right), \quad (25)$$

где Ω и Ω_{0n} выражены теперь в единицах ω'_{01} . Эту формулу можно привести к виду (23), по которому расчеты уже были выполнены:

$$z(\Omega) = i\omega_{01} \Omega \left(M' + \rho \sum_{n=1}^N \frac{V_n}{1 - \frac{\Omega^2}{\Omega_{0n}^2}} \right), \quad (26)$$

где $M' = \frac{M}{\alpha}$.

Таким образом, при изменении нижней граничной частоты параметры поглотителя должны быть изменены в соответствии с формулами (23) и (24), а расчет импеданса (и коэффициента отражения) можно проводить по "старым" формулам с изменением величины массы стенки. Значение $\Omega = 1$ в этом случае будет соответствовать новому значению ω'_{01} .

В соответствии с изложенным, был проведен расчет частотной характеристики поглотителя с граничной частотой 500 Гц (диапазон частот от 500 Гц до 5 кГц) для тех же толщин стенки. Результаты, приведенные на рис. 6, показывают, что эффективность поглотителя с понижением рабочих частот возрастает. Для ее повышения на высоких частотах необходимо, по-видимому, ввести в его конструкцию дополнительные элемен-

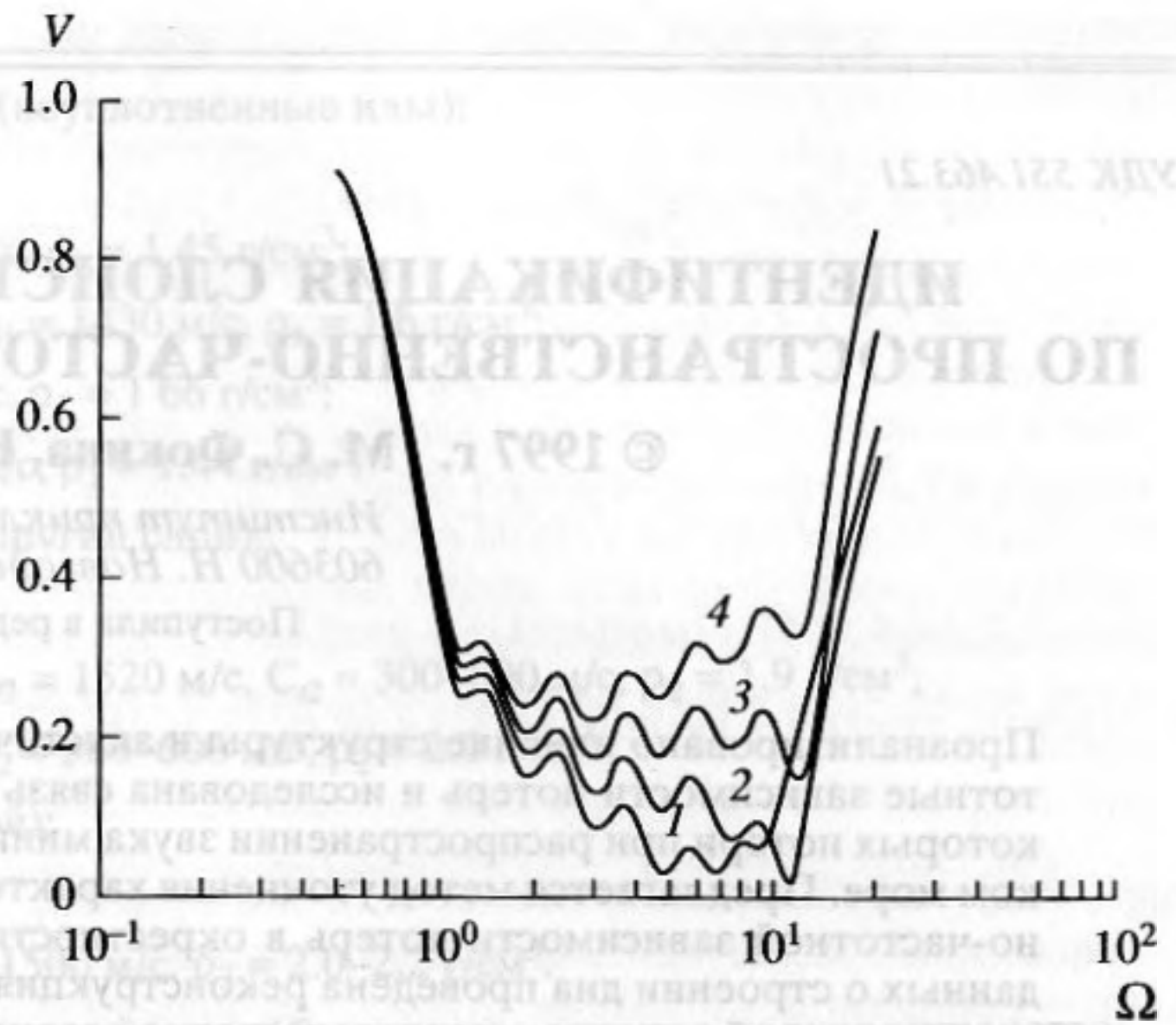


Рис. 6. То же, что на рис. 5. Значение $\Omega = 1$ соответствует частоте 500 Гц; 1 – 0 см, 2 – 0.2 см, 3 – 0.4 см, 4 – 0.6 см.

ты, способные понизить реактивную составляющую импеданса стенки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ричардсон И.Д. Некоторые вопросы прикладной акустики. М.: Воениздат, 1962. 175 с.
2. Hladky-Hennion A.C., Decarpigny J.N. Note on the validity of using plane-wave type relations to characterize Alberich anechoic coatings // J. Acoust. Soc. Amer. 1992. V. 92. № 5. P. 2878–2882.
3. Khoury M. Two different ways to characterize anechoic materials // IDF Conference Proceedings 1993. P. 353.
4. Garnier B., Lefebvre T., Soulie J.C. The increasing role of external coating to control acoustic signatures // UDF Conference Proceedings 1993. P. 346–353.
5. Тютекин В.В., Шкварников А.П. Синтез и исследование поглотителей изгибных волн в стержнях и пластинах // Акуст. журн. 1972. Т. 18. № 3. С. 441–447.
6. Клюкин И.И. Об ослаблении волн изгиба в стержнях и пластинах при помощи резонансных колебательных систем // Акуст. журн. 1960. Т. 6. № 2.

Computer Simulation of a Sound Absorber Synthesized from Mechanical Resonators

V. V. Tyutekin

The results of computer simulation of an underwater acoustic absorber based on mechanical resonators are presented. The absorber is synthesized assuming resonators with a continuous and a discrete spectrum. The absorber impedances calculated for the two cases and the frequency dependences of their reflection coefficients are given.