НИИСФ Госстроя СССР

Пособие

по расчету и проектированию многослойных звукопоглощающих систем (конструкций) (к СНиП II-12-77)

Москва 1987

gost.e-ecolog.ru

Научно-исследовательский институт
строительной физики
(НИИСФ) Госстроя СССР

Пособие

по расчету и проектированию многослойных звукопоглощающих систем (конструкций) (к СНиП II-12-77)

Утверждено
приказом НИИСФ Госстроя СССР
от 24 сентября 1985г. №39-и

Москва Стройиздат 1987

УДК 691.419.001.24:699·844

Рекомендовано к изданию Научно-техническим советом НИИСФ Госстроя СССР.

Пособие по расчету и проектированию многослойных звукопоглощающих систем (конструкций) (к СНиП II-12-77)/ НИИСФ. — М.: Стройиздат, 1987. 32 с.

Изложены методы расчета импеданса и коэффициента звукопоглощения однослойных и многослойных резонаторов, а также системы последовательно связанных резонаторов; приведены номограммы для определения параметров резонатора, обеспечивающих резонансное поглощение звука при заданной частоте.

Для инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектных организаций.

Табл. 8, ил. 14.

П $\frac{3202000000—692}{047(01)—87}$ Инструкт.-нормат., 1 вып. — 78 — 87

© Стройиздат, 1987

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разработка и внедрение новых звукопоглощающих конструкций, обеспечивающих эффективное снижение звука при минимальном расходе дефицитных акустических материалов, для улучшения условий труда рабочих и служащих приобретает особенно большое значение.

Постоянный рост мощности и габаритов промышленных установок приводит к значительному увеличению уровней производственных шумов, в частности в области низких частот (менее 500 Гц), в которой, как известно, обычные звукопоглощающие конструкции малоэффективны. Для снижения уровня производственного шума в низкочастотном диапазоне целесообразно применять резонансные поглотители звука, описание которых дано в настоящем Пособии.

Многослойные резонансные системы, настроенные на селективное поглощение звуковой энергии в узкой частотной полосе, могут быть использованы также в глушителях шума вентиляционных установок наряду с широкополосными звукопоглощающими конструкциями.

Пособие разработано НИИСФ Госстроя СССР (канд. техн. наук Н. Н. Воронина).

1. РЕЗОНАНСНЫЙ ПОГЛОТИТЕЛЬ ЗВУКА. АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1. Резонансный поглотитель звука, или резонатор, представляет собой жесткий экран, перфорированный отверстиями (рис. 1, *а*) и расположенный на некотором расстоянии от ограждения (рис. 1, *б*).

В качестве перфорированного экрана могут быть использованы алюминиевые листы, гипсовые, древесно-волокнистые и асбестоцементные плиты, а также другие материалы, обладающие достаточной жесткостью.

Лист перфорируют равномерно. Отверстия могут быть различной формы: круглые, квадратные, прямоугольные, щелевые. Чаще всего применяют экраны с круглыми отверстиями, расположенными в квадратной ячейке (см. рис. 1, *а*).

Наличие перегородок в воздушной полости конструкции (см. рис. 1, *б*) между резонансными ячейками не является обязательным, но в отдельных случаях способствует повышению механической прочности системы и устранению нежелательных собственных колебаний перфорированного экрана, зависящих от общей площади листа.

Активные потери звуковой энергии в резонаторе реализуют размещением вблизи отверстий экрана стеклоткани или тонкого войлока.

Возможны и другие варианты резонансного поглотителя, в котором воздушная полость полностью или частично заполнена волокнистым звукопоглощающим материалом, как показано на рис. 1, *в, г*.

К параметрам, характеризующим конструктивные особенности, относятся: $l_э$ — толщина экрана, см; D_0 — поперечный размер отверстия, см; S_0 — площадь отверстия, см²; $b_э$ — шаг перфорации, равный расстоянию между отверстиями; S — площадь единичной ячейки, см², на которой располагается одно отверстие; $\eta_э$ — коэффициет перфорации экрана, равный отношению площадей отверстия и единичной ячейки, L — глубина воздушной полости, см; $l_{сл}$ — толщина слоя волокнистого материала, размещенного в полости, см.

Величины $l_э$, L, D_0, $b_э$ должны удовлетворять следующим требованиям:

$$l_э \ll L;\ L < \lambda_р/4;\ D_0 < \lambda_р/4;\ b_э < \lambda_р/4;$$

где $\lambda_р$ — длина звуковой волны на частоте резонанса $f_р$ системы.

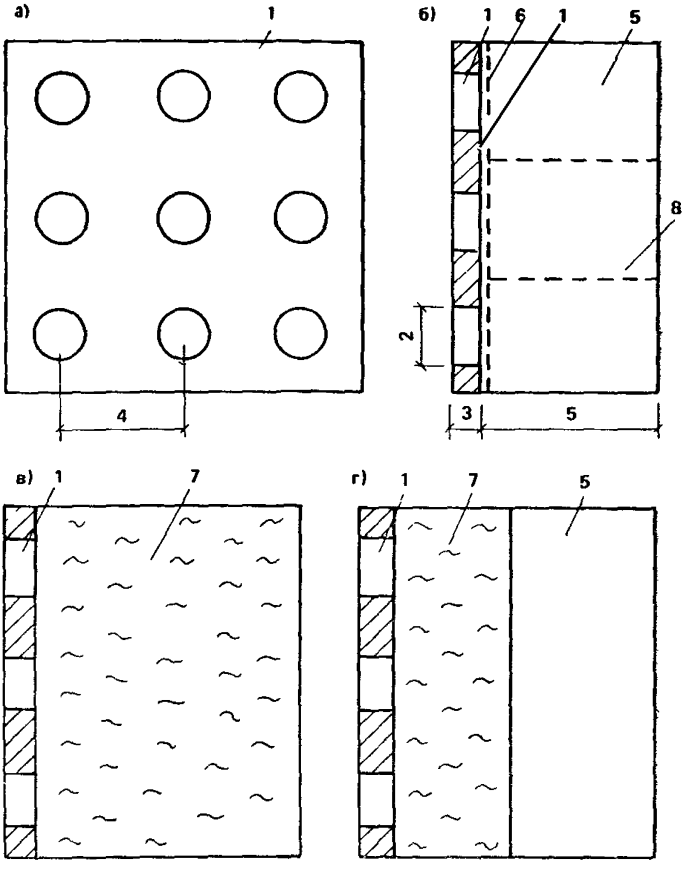


Рис. 1. Однослойный резонатор

а — вид спереди; *б* — вид в разрезе; *в* — то же, с заполнением воздушной полости волокнистым материалом; *г* — то же, с частичным заполнением полости материалом; *1* — перфорированный экран; *2* — диаметр отверстия D_0, см; *3* — толщина экрана $l_э$, см; *4* — сторона ячейки $b_э$, см; *5* — глубина воздушной полости $\overline{L}$, см; *6* — ткань; *7* — волокнистый материал; *8* — перегородка

1.2. Звукопоглощающие свойства резонатора характеризуют акустическим импедансом $Z_р$ и коэффициентом звукопоглощения $\alpha_р$.

Акустический импеданс определяют как отношение звукового давления к произведению линейной колебательной скорости частиц среды на площадь поверхности, нормальной к направлению распространения плоской звуковой волны. В практических расчетах используют безразмерный импеданс $Z_р$, выраженный в долях волнового сопротивления воздуха $\rho_0 c_0$, где ρ_0 — плотность воздуха, г/см³; c_0 — скорость звука в воздухе, см/с.

В общем случае импеданс является комплексной величиной, за-

висящей от угла падения Θ звуковой волны на конструкцию согласно следующим выражениям:

$$\text{при } \Theta = 0^\circ \quad Z_p = R_p + j\,Y_p; \tag{1}$$

$$\text{при } \theta \neq 0^\circ \quad Z_p^\theta = (R_p + jY_p)\cos\theta, \tag{2}$$

где R_p и Y_p — действительная и мнимая компоненты импеданса Z_p при нормальном падении звуковой волны.

Коэффициент звукопоглощения α_p, равный отношению поглощенной звуковой энергии к падающей, может быть вычислен по известному значению импеданса согласно формулам:

$$\text{при } \theta = 0^\circ \quad \alpha_p = 4\,R_p\,/\,[(R_p+1)^2 + Y_p^2]; \tag{3}$$

$$\text{при } \theta \neq 0^\circ \quad \alpha_p^\theta = 4\,R_p\cos\theta\,/[(R_p\cos\theta+1)^2 + Y_p^2\cos^2\theta]. \tag{4}$$

В диффузном поле помещения, в котором все углы падения равновероятны, а распределение плотности звуковой энергии является равномерным по всему объему, акустические свойства резонансного звукопоглотителя характеризуют статистическим коэффициентом звукопоглощения $\bar{\alpha}_p$, определяемым по формуле Пэриса

$$\bar{\alpha}_p = \int_0^{90} \alpha_p^\theta \sin\theta\, d\,\theta = 0{,}174\ [(x_0 + x_{90})/2 + x_{10} + \ldots + x_{80}], \tag{5}$$

где $x_\theta = \alpha_p^\theta \sin\theta\, d\,\theta$ вычисляют при $\theta = 0^\circ, 10^\circ, \ldots, 90^\circ$ с использованием выражения (4).

Акустический импеданс и коэффициент звукопоглощения резонатора являются в общем виде достаточно сложными функциями частоты звука. В отличие от других поглощающих конструкций (в частности, широкополосных) частотная зависимость коэффициента звукопоглощения резонансной системы имеет четко выраженный максимум на резонансной частоте f_p, определяемой из уравнения

$$Y_p = 0 \tag{6}$$

Максимальное значение коэффициента звукопоглощения вычисляют по формулам:

$$\text{при } \theta = 0^\circ \quad \alpha_{p\max} = 4\,R_p/(R_p+1)^2; \tag{7}$$

$$\text{при } \theta \neq 0^\circ \quad \alpha_{p\max}^\theta = 4R_p\cos\theta/(R_p\cos\theta+1)^2. \tag{8}$$

Акустическую эффективность резонансного поглотителя харак-

теризуют также шириной резонансной кривой поглощения $\Delta f = f_2 - f_1$, где f_2 и f_1 — частоты, в которых величина α_p равна половине максимального значения коэффициента звукопоглощения ($\alpha_p = 0{,}5 \quad \alpha_{p\,max}$).

С учетом частотных зависимостей действительной и мнимой компонент импеданса Z_p величину f_1 (или f_2) определяют согласно уравнению

$$(R_p(f_1) + 1)^2 + Y_p^2(f_1) = [2R_p(f_1)/(R_p(f_p)](R_p(f_p)+1)^2. \qquad (9)$$

В разд. 2—4 настоящего Пособия представлены методы расчета резонаторов различных типов Формулы приведены только для случая нормального падения звуковой волны на систему. При необходимости могут быть вычислены и угловые зависимости величин Z_p и α_p с использованием выражений (2) и (4) соответственно.

2. РАСЧЕТ ИМПЕДАНСА И КОЭФФИЦИЕНТА ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ ОДНОСЛОЙНОГО РЕЗОНАТОРА

2.1. Акустический импеданс Z_p и коэффициент звуконоглощения α_p однослойного резонатора с одним перфорированным экраном определяют по заданным численным значениям конструктивных параметров $l_э$, D_0, $\eta_э$, L, перечисленных в п. 1.1.

Кроме того, величины Z_p и α_p зависят от акустических характеристик звукопоглощающего материала (ткани, волокнистого поглотителя) и способа размещения такового в воздушной полости резонатора (см. рис. 1 *б* — *г*), а также от частоты звука.

Если в конструкции однослойного резонатора используют стеклянную ткань (см. рис. 1, *б*), то частотную зависимость действительной компоненты импеданса рассчитывают согласно следующему выражению:

$$R_p = R_1 + R_2, \qquad (10)$$

где $R_1 = \sqrt{\sigma}(1+\sigma^4)(\operatorname{ctg} kL)/\left(1 + \frac{km}{\rho_0}\right)(1+2\sigma)^2,$

$$R_2 = km\,\sigma\sqrt{\sigma(1+2\sigma)}/\rho_0(1+2\sigma^3)^2;$$

σ — безразмерное сопротивление продуванию ткани, выраженное в долях волнового сопротивления воздуха $\rho_0 c_0$; m — поверхностная масса, г/см^2; $k = 2\pi f/c_0$ — волновое число в воздухе, 1/см; f — частота звука, Гц.

В соответствии с требованиями «Рекомендаций по расчету и

проектированию звукопоглощающих облицовок» (М.: Стройиздат, 1984) сопротивление продуванию тканей полотняного плетения рассчитывают по эмпирической формуле

$$\sigma = (m N\, 10^{-4}/\rho_0 \sqrt{d_н\, l_{тк}})^2, \qquad (11)$$

где $l_{тк}$ — толщина ткани, см; N — число нитей на 1 см, равное среднему арифметическому из количества нитей по основе и по утку; $d_н$ — ширина нити, см.

Физико-технические параметры стеклянных тканей и некоторых других защитных покрытий отечественного производства приведены в прил. 1.

Мнимую компоненту $Y_р$ импеданса резонансной конструкции рассчитывают согласно следующему выражению:

$$Y_р = Y_э + Y_п + Y_2; \qquad (12)$$

$$Y_2 = 0{,}2\,(Y_1 + \sqrt{2Y_1});$$

где $Y_1 = km\,\sigma\sqrt{\sigma}\,(1+2\sqrt{\sigma})^2/\rho_0\,(1+2\sigma^2)^2$;

$Y_п = -\mathrm{ctq}\,kL$ — импеданс воздушной полости; $Y_э$ — инерционный импеданс перфорированного экрана, для вычисления которого используют равенство

$$Y_э = k\,(l_э + 2\delta)\,/\eta_э. \qquad (13)$$

где δ — концевая поправка к толщине экрана $l_э$, см, введенная для условного обозначения протяженности ближнего поля отверстия, возникающего за счет нарушения плоского течения вблизи преграды.

Для круглых отверстий диаметром D_0, расположенных в квадратных ячейках с коэффициентом перфорации $\eta_э$, концевая поправка может быть вычислена по формуле.

$$\delta = 0{,}395 D_0 (1 - 1{,}47\sqrt{\eta_э} + 0{,}47\eta_э\sqrt{\eta_э}). \qquad (14)$$

В прил. 2 приведены формулы для расчета концевых поправок отверстий различной формы, в том числе и щелевых.

Формулы (10) и (12) справедливы при условии неплотного контакта ткани и перфорированного экрана, когда между ними имеется зазор глубиной $0{,}25\,\delta \leqslant l \leqslant 0{,}5\,\delta$ см.

Если ткань вплотную примыкает к экрану, т. е. осуществляется плотный контакт (ПК), то действительную и мнимую компоненты импеданса резонатора вычисляют из соответствующих равенств:

$$R_р^{пк} = R_р + \Delta R_р; \quad Y_р^{пк} = Y_р + \Delta Y_р,$$

где $\Delta R_p = 0{,}5\sigma Y_э$; $\Delta Y_p = 0{,}1\sigma Y_э$.

Коэффициент звукопоглощения резонатора рассчитывают согласно выражению (3) с учетом равенств (10) и (12), а также условия прилегания ткани к экрану.

Для достижения достаточно высокого значения (0,9—1) максимального коэффициента звукопоглощения на резонансной частоте действительная компонента импеданса должна быть выбрана согласно требованию, полученному из равенств (7) и (8):

$$0{,}6 \leqslant R_p(f_p) \leqslant 2. \qquad (15)$$

Резонансную частоту определяют из уравнения (6), преобразованного с учетом выражений (12) и (13):

$$-\operatorname{ctg} k_p L + Y_2 + k_p(l_э + 2\delta)/\eta_э = 0, \qquad (16)$$

где $k_p = 2\pi f_p / c_0$ — резонансное волновое число, 1/см.

В общем случае уравнение (16) является трансцендентным и решается графическим способом.

Если в уравнении (16) величина Y_2 равна нулю, а $ctg\ k_p L = 1/k_p L$, то резонансную частоту f_p и значения частот f_2, f_1, определяющих ширину кривой резонансного поглощения согласно равенству (9), рассчитывают по формулам соответственно:

$$f_p = c_0 \sqrt{\eta_э} / 2\pi \sqrt{L(l_э + 2\delta)}; \qquad (17)$$

$$k_{p2,1}^2 L(l_э + 2\delta)/\eta_э \mp k_{p2,1} L(R_p + 1) - 1 = 0. \qquad (18)$$

При этом величину R_p в уравнении (18) приближенно приравнивают сопротивлению продувания ткани.

Выражения (17), (18) справедливы для резонатора с глубиной воздушной полости $L \leqslant 0{,}4/k_p$ в частотном диапазоне ниже 500 Гц при использовании легких стеклянных тканей или других защитных покрытий, физико-технические параметры которых удовлетворяют следующему условию:

$$m\sigma/(1+\sigma)\rho_0 \leqslant 0{,}1/k_p. \qquad (19)$$

Так, согласно выражению (19), для $f_p = 400$ Гц поверхностная масса должна быть менее 0,0075 г/см², а сопротивление продуванию — менее 0,3. Таким требованиям удовлетворяют параметры m и σ защитных покрытий и тканей, перечисленных в прил. 1.

Для более массивных покрытий при $m > 0{,}0075$ и $\sigma > 0{,}3$ резонансную частоту системы определяют из уравнения (16) графическим способом, как показано в примере 1.

Пример 1. Требуется рассчитать в частотном диапазоне 100—1000 Гц импеданс Z_p, коэффициент звукопоглощения α_p резонансную частоту f_p и ширину Δf резонансной кривой поглощения при нормальном падении звуковой волны на однослойный резонатор с глубиной полости $L = 6$ см и с параметрами перфорированного экрана: $D_0 = 3$ см; $l_э = 0{,}5$ см; $\eta_э = 0{,}085$. Внутри резонатора с небольшим зазором от экрана размещена стеклянная ткань марки Э3-100 — ГОСТ 19907 (табл. прил. 1) с сопротивлением продувания $\sigma = 0{,}62$ и поверхностной массой $m = 0{,}0108$ г/см^2.

Расчет проводят на частоте 300 Гц.

Вычисляют: согласно выражению (14) концевую поправку $\delta = 1{,}2\ (1 - 0{,}43 + 0{,}11) = 0{,}7$ см; волновое число $k = 0{,}055$; согласно равенству (13), инерционный импеданс экрана $Y_э = 1{,}23$; величину $kL = 0{,}33$; импеданс воздушной полости $Y_п = -ctq\ kL = -3{,}05$; согласно выражениям (10) и (12), действительную компоненту импеданса $R_p = R_1 + R_2 = 0{,}37 + 0{,}16 = 0{,}53$ и мнимую компоненту $Y_p = Y_э + Y_п + Y_2 = 1{,}23 - 3{,}05 + 0{,}3 = -1{,}52$, а также коэффициент звукопоглощения $\alpha_p = 0{,}45$, согласно равенству (3).

Результаты расчета импеданса и коэффициента звукопоглощения на других частотах в диапазоне 100—1000 Гц приведены в табл. 1 и представлены графически на рис. 2, *а, б*.

Таблица 1

f, Гц	$Y_п$	km/ρ_0	R_1	R_2	Y_1	Y_2	$Y_э$	$Y_п + Y_2$	R_p	Y_p	α_p
100	−9,15	0,16	1,43	0,05	0,16	0,14	0,41	−9	1,48	−8,59	0,07
200	−4,5	0,32	0,62	0,1	0,33	0,23	0,82	−4,27	0,72	−3,45	0,2
300	−3,05	0,48	0,37	0,16	0,49	0,3	1,23	−2,75	0,53	−1,52	0,45
400	−2,13	0,64	0,24	0,21	0,66	0,36	1,64	−1,77	0,45	−0,13	0,86
500	−1,64	0,8	0,16	0,26	0,82	0,42	2,05	−1,22	0,42	0,83	0,62
600	−1,29	0,96	0,12	0,32	0,98	0,48	2,46	−0,81	0,44	1,65	0,36
800	−0,83	1,28	0,06	0,42	1,31	0,58	3,26	−0,25	0,48	3	0,17
1000	−0,51	1,6	0,03	0,53	1,64	0,68	4,1	0,17	0,55	4,27	0,11

Резонансную частоту $f_p = 410$ Гц определяют из графика на рис. 2, *а* в точке пересечения функции Y_p с осью абсцисс, т. е. при $Y_p = 0$.

Пунктирными линиями на рис 2 показаны величины $R_p = \sigma$, $Y_p = Y_э + Y_п$ и коэффициент звукопоглощения, рассчитанный по формуле (3) при условии $Y_2 = 0$ Из сравнения кривых следует, что пренебрежение частотной зависимостью импеданса ткани при расположении ее на относе от жесткого основания, представленной

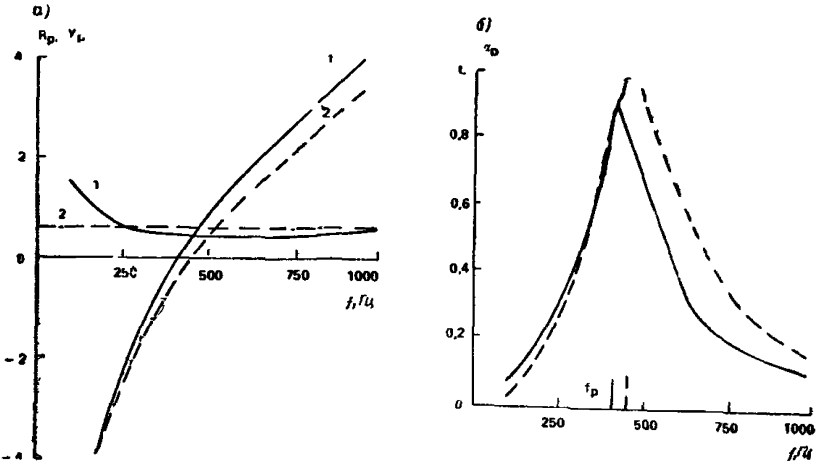


Рис. 2. Частотные зависимости импеданса R_p, Y_p(а) и коэффициента звукопоглощения α_p (б) однослойного резонатора с тканью 33-100

1 — рассчитанные по формулам (10), (12) и (3); *2* — то же, при $R_p=\sigma$ и $Y_p=Y_э+Y_п$

выражениями (10) и (12), может привести к значительным погрешностям при вычислении коэффициента звукопоглощения, а также резонансной частоты. Так, в рассматриваемом варианте конструкции расхождение между значениями f_p, полученными по двум указанным выше методам, составляет 50 Гц. При использовании в резонаторах более массивных тканей следует ожидать, что это расхождение будет еще более заметным.

2.2. При наклонном падении звуковой волны коэффициент звукопоглощения резонансной системы вычисляют по формулам (2), (4), (5) соответственно с учетом некоторых особенностей расчета угловой зависимости импеданса воздушной полости с перегородками и без таковых, представленной в прил. 3.

В прил. 4 изложен метод расчета импеданса и коэффициента звукопоглощения однослоиного резонатора, воздушная полость которого заполнена волокнистым материалом.

Выбор параметров резонатора, обеспечивающих заданную частоту резонанса

2.3. В общем случае определение параметров резонатора D_0 $\eta_э$, $l_э$ и L основано на решении уравнения (16) при заданном значении резонансной частоты f_p. Как показано в п. 2.1, для резонаторов с легкой тканью при условии $kL \leqslant 0{,}4$ параметры могут быть определены из равенства (17), решение которого является многозначным, т. е. заданное значение f достигается при различных сочетаниях величин D_0, $\eta_э$, $l_э$, L. Однако при проектирова-

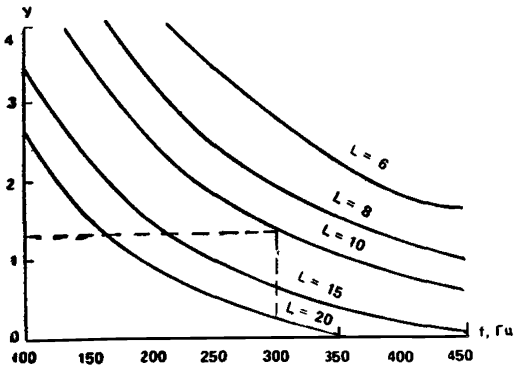


Рис. 3. Частотная зависимость мнимой компоненты $Y=Y_п - Y_э$ импеданса однослойного резонатора с тканью Э3-100, рассчитанная при различных значениях глубины воздушной полости

нии однослойных резонансных поглотителей приходится учитывать требования практики к параметрам конструкции. В первую очередь это относится к глубине воздушной полости, которая, как правило, определена конструктивно. Так, в помещениях с низкими потолками или в глушителях шума вентиляционных установок величина L должна быть выбрана из условия $L \leqslant 20$ см.

Толщина $l_э$ перфорированного экрана является также известной величиной.

При $f_р \leqslant 500$ Гц коэффициент перфорации экрана должен удовлетворять требованию: $\eta \leqslant 0{,}1$. Тогда диаметр отверстия определяют при заданных значениях $f_р$, $\eta_э$, l L согласно равенству (17), преобразованному с учетом выражения (14):

$$D_0 = 1{,}25(\eta_э/k_р^2 L - l_э)/(1 - 1{,}47\sqrt{\eta_э} + 0{,}47\eta_э\sqrt{\eta_э}). \qquad (20)$$

Из равенства (20) следует, что диаметр отверстия увеличивается при уменьшении резонансной частоты ниже 300 Гц, что в ряде случаев неприемлемо для практики. Поэтому при $L \leqslant 20$ см величину $f_р$ следует задавать в частотном диапазоне 300—500 Гц. Если в подвесных потолках промышленных зданий возможно устройство резонаторов с достаточно большим относом $L > 20$ см от жесткого основания, то однослойный резонатор может быть настроен на достаточно низкую частоту в диапазоне 100—250 Гц без заметного увеличения поперечных габаритов системы.

2.4. При использовании массивных защитных перекрытий с сопротивлением продувания $\sigma > 0{,}3$ в резонаторах с глубиной воздушной полости $L \leqslant 20$ см уравнение (16) может быть решено только графически посредством номограмм, одна из которых показана на рис 3 Номограмма представляет собой семейство кривых $Y = -Y_п - Y_2$, построенных согласно выражению (12) в зависи-

мости от частоты для однослойной резонансной конструкции с тканью Э3-100 при изменении глубины воздушной полости от 6 до 20 см. Индексы кривых соответствуют значениям L.

Метод определения параметров резонатора сводится к нахождению высоты перпендикуляра, восстановленного в точке $f=f$ оси абсцисс на номограмме (см. рис. 3) до пересечения с кривой с заданным индексом L. Ордината полученной точки соответствует значению инерционного импеданса $Y_{эр}$ экрана на частоте резонанса Тогда при известных значениях величин $\eta_э$ и $l_э$ диаметр отверстия экрана может быть рассчитан согласно равенству

$$D_0=1{,}25(\eta_э Y_{эр}/k_р-l_э)/(1-1{,}47\sqrt{\eta_э}+0{,}47\eta_э\sqrt{\eta_э}). \qquad (21)$$

В прил. 5 приведены различные сочетания параметров D_0, L, $l_э$, $\eta_э$, $b_э$ однослойного резонатора с тканью Э3-100, обеспечивающих заданное значение резонансной частоты в диапазоне 125—350 Гц. Значения диаметра отверстия рассчитаны по равенству (21) с использованием номограммы (см. рис. 3).

3. РАСЧЕТ ИМПЕДАНСА И КОЭФФИЦИЕНТА ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ ДВУХСЛОЙНОГО РЕЗОНАТОРА

3.1. При фиксированном значении глубины полости резонатора понижение резонансной частоты системы может быть достигнуто применением не одного, а нескольких перфорированных экранов (рис. 4, *а*, *г*), установленных параллельно друг другу с некоторым зазором l, см, удовлетворяющим условиям $0<l\leqslant 0{,}5\,\delta$ и $l<<L$.

В этом случае инерционный импеданс системы экранов Y_c увеличивается по сравнению с величиной $Y_{эl}$ отдельного экрана. Степень увеличения общей инерционности многослойной конструкции зависит от взаимного расположения осей отверстий соседних экранов.

При соосном расположении отверстий двух одинаковых экранов (см. рис. 4, *а*) импеданс Y_c меньше суммы импедансов $Y_{эl}$, вычисленных по формуле (13), и определяется при $l\leqslant 0{,}5\,\delta$ следующим выражением:

$$Y_c=k(2l_э+l)/\eta_э\,. \qquad (22)$$

Если диаметры отверстий и коэффициенты перфораций двух соседних экранов не равны друг другу ($D_{01}\neq D_{02}$ и $\mu_{э.1}\neq\mu_{э.2}$), где индексы 1 и 2 относятся к первому и второму экрану соответ-

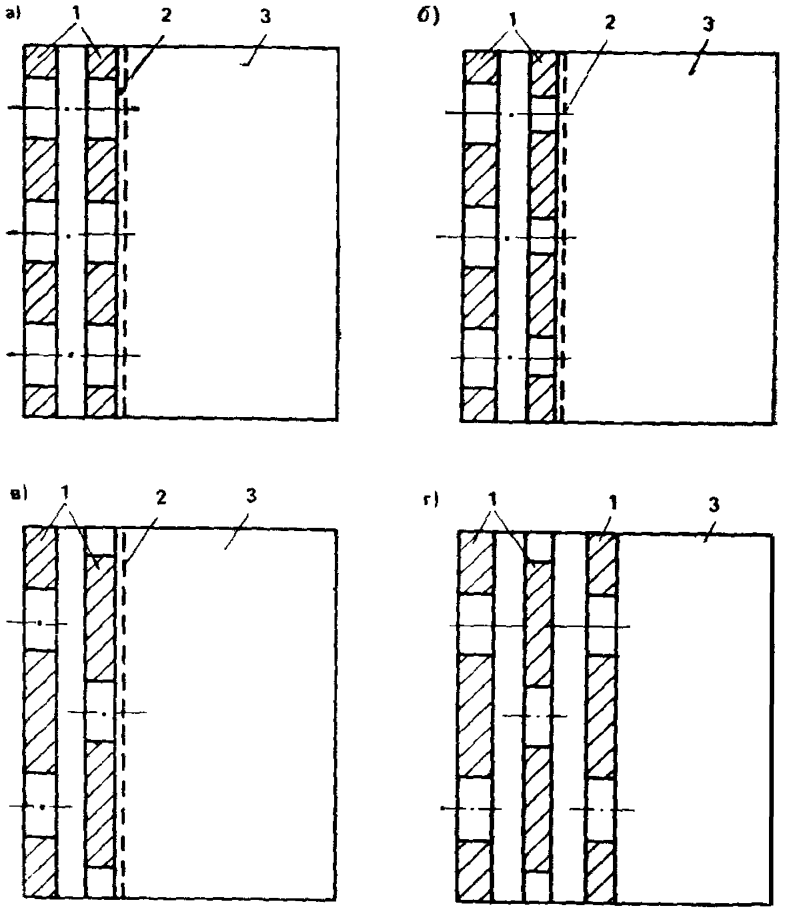


Рис. 4. Схемы двухслойного резонатора

а — с двумя одинаковыми экранами при соосном расположении отверстий; *б* — то же при различных диаметрах отверстий экранов; *в* — с двумя одинаковыми экранами, оси отверстий которых сдвинуты относительно друг друга; *г* — то же, с тремя экранами; *1* — перфорированны экран; *2* — ткань; *3* — воздушная полость

ственно), то импеданс такой системы вычисляют согласно формуле

$$Y_c = k\delta_1/\eta_{э1} + k\delta_2/\eta_{э2} + (l_{э1} + l_{э2})D_{01}/\eta_{э1}D_{02}.$$

Акустические свойства двухслойного резонатора характеризуют импедансом $Z_{рд} = R_{рд} + jY_{рд}$.

Величину $R_{рд}$ вычисляют согласно выражению (10) при расположении ткани за системой экранов. Мнимую компоненту импеданса $Y_{рд}$ рассчитывают согласно равенству (12) при замене величины $Y_з$ на Y_c.

Пример 2. Требуется рассчитать в частотном диапазоне 100—500 Гц импеданс $Z_{рд}$ и коэффициент звукопоглощения $\alpha_{рд}$ двухслойного резонатора с двумя одинаковыми перфорированными экранами с соосными отверстиями, расположенными с зазором l=0,4 δ см. Параметры экрана, ткани и глубину воздушной полости резонатора принимают согласно значениям, приведенным в примере 1.

При δ=0,7 см глубину зазора выбирают равной l=0,3 см. Инерционный импеданс $Y_с$ системы двух параллельных экранов вычисляют согласно формуле (22) $Y_с$=31,7 k. Численные значения величин $Y_с$, $Y_{рд}$, $R_{рд}$ и $\alpha_{рд}$, рассчитанные по аналогии с примером 1, приведены в табл. 2.

Таблица 2

f, Гц	$Y_п+Y_з$	$Y_с$	$R_{рд}$	$Y_{рд}$	$\alpha_{рд}$
100	—9	0,58	1,48	—8,42	0,08
200	—4,27	1,16	0,72	—3,1	0,22
300	—2,75	1,74	0,53	—1	0,63
400	—1,77	2,32	0,45	0,55	0,75
500	—1,22	2,9	0,42	1,68	0,35

Резонансная частота конструкции, определенная графически, равна 360 Гц. Следовательно, внесение в резонатор еще одного перфорированного экрана при условии соосного расположения отверстий двух соседних экранов изменяет величину $f_р$ =410 Гц для той же однослойной системы (пример 1) всего на 50 Гц. Использование многослойных резонансных поглотителей с соосным расположением отверстий экранов не всегда целесообразно, так как не приводит к существенному снижению резонансной частоты системы

3.2. В том случае, когда оси отверстий двух экранов сдвинуты относительно друг друга, как это показано на рис. 4, *в*, *г*, величину $Y_с$ такой конструкции вычисляют по формуле

$$Y_с=Y_{э1}+Y_{э2}. \qquad (23)$$

Величина $Y_{эi}$ в формуле (23) может быть рассчитана согласно выражению

$$Y_{эi}=k(l_{эi}+\delta_{li}+\delta_i)/\eta_{эi}, \qquad (24)$$

где δ_l — концевая поправка к толщине экрана с внутренней стороны отверстия, введенная для условного обозначения эффекта

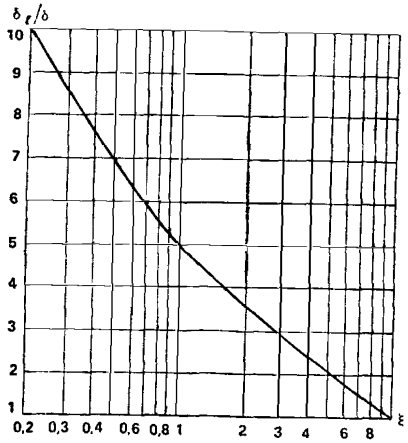


Рис. 5. Зависимость отношения δ_l/δ от переменной ξ

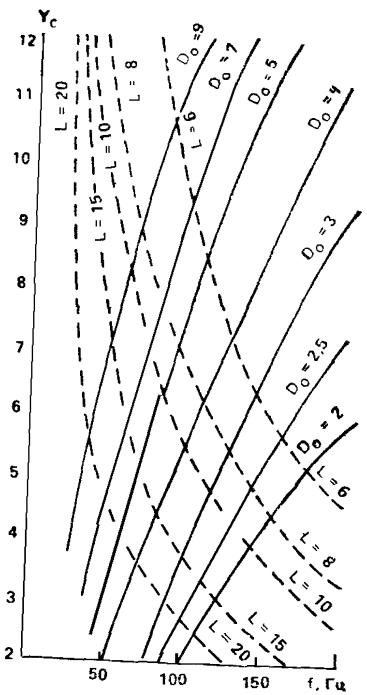


Рис. 6. Номограмма для определения инерционного импеданса системы двух одинаковых перфорированных экранов, расположенных с зазором l=0,15 δ см при $\eta_э$=0,06 и $l_э$=0,1 см

дополнительной инерционности, возникающего за счет искривления потока в узком канале шириной l между экранами.

Концевая поправка δ_1 может быть определена с помощью номограммы, представленной на рис. 5, по значению переменной ξ, вычисляемой через параметры экранов по следующей формуле:

$$\xi = 100\ kl\,\delta_1 / \left[D_{02}\eta_{э1}(1-\eta_{э1})\right], \qquad (25)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют первому и второму экранам.

При расчете величины ξ для второго экрана в формуле (25) следует поменять местами индексы.

В качестве примера на рис. 6 представлена номограмма для определения инерционного импеданса Y_c системы, состоящей из двух одинаковых перфорированных экранов, расположенных на расстоянии l=0,15 δ см друг от друга при $\eta_э$=0,06 и $l_э$=0,1 см. Индекс кривых соответствует значению диаметра отверстия. Пунктирными линиями на том же графике проведены частотные зависимости импеданса воздушной полости $Y_п$, рассчитанные для различных значений глубины L.

В прил. 6 даны аналогичные номограммы, построенные для $\eta_э = 0{,}07—0{,}09$.

При малых значениях зазора $0 < l \geqslant 0{,}5\ \delta$ между экранами действительную компоненту $R_{рд}$ импеданса двухслойного резонатора определяют по формуле

$$R_{рд} = R_р + \Delta R, \tag{26}$$

$$\text{где } \Delta R = \frac{3\,\mu S}{\pi \rho_0 c_0 l^3} \ln\left(\frac{2}{\eta_{э1} + \eta_{э2}} - 1\right)(1 + 0{,}105\,y); \tag{27}$$

$$y = 0{,}5\,\pi\, l \sqrt{\pi \rho_0 f}\,/\,\mu = 7{,}1 l \sqrt{f}; \tag{28}$$

$\mu = 1{,}88 \cdot 10^{-4}$ г·см/с — динамическая вязкость воздуха.

Величины $R_{рд}$ и l, а также параметры ткани должны быть выбраны в соответствии с условием (15).

Двухслойную систему экранов, оси отверстий которых сдвинуты относительно друг друга, следует применять в конструкции резонатора с очень легкими тканями либо совсем без таковых, поскольку активные потери обеспечиваются, как правило, за счет достаточно большой величины ΔR При увеличении зазора между экранами до значения $l \geqslant 1{,}2\ \delta$ см эффектом дополнительной инерционности можно в расчетах пренебречь: $\Delta R = 0$ и $\delta_l = \delta$, $Y_с = 2Y_э$, где величину $Y_э$ рассчитывают согласно равенству (13).

Дальнейшее увеличение расстояния между экранами ($l >> \delta$) приводит к системе двух связанных последовательно резонаторов, метод расчета импеданса которых изложен в разд. 4 настоящего Пособия.

Пример 3. Требуется рассчитать в частотном диапазоне 100—500 Гц импеданс $Z_{рд}$ и коэффициент звукопоглощения $\alpha_{рд}$ двухслойного резонатора с двумя одинаковыми перфорированными экранами, оси отверстий которых сдвинуты относительно друг друга. Параметры экранов и глубина воздушной полости резонатора приведены в примере 1. Значение зазора между экранами принимается равным 0,2 δ см.

Расчет проводят на частоте 300 Гц.

Вычисляют: величину $l = 0{,}2\ \delta = 0{,}14$ см при $\delta = 0{,}7$ см; согласно равенствам (28) и (27) соответственно величины $y = 17{,}2$ и $\Delta R = 0{,}87$. Для определения инерционного импеданса рассчитывают, согласно формуле (25), переменную $\xi = 2{,}3$. По номограмме (рис. 5) определяют $\delta_l = 3{,}35\ \delta = 2{,}3$ при $\delta = 0{,}7$ см и $\xi = 2{,}3$. Согласно выражениям (24) и (23) вычисляют соответственно $= (0{,}5 + 0{,}7 + 2{,}3) \times 0{,}055/0{,}085 = 2{,}3$ и $Y_с = 2Y_э = 4{,}6$.

Используя данные табл. 1, рассчитывают по выражению (12) величину $Y_{рд} = -3{,}05 + 4{,}6 = 1{,}55$ в отсутствие ткани в двухслой-

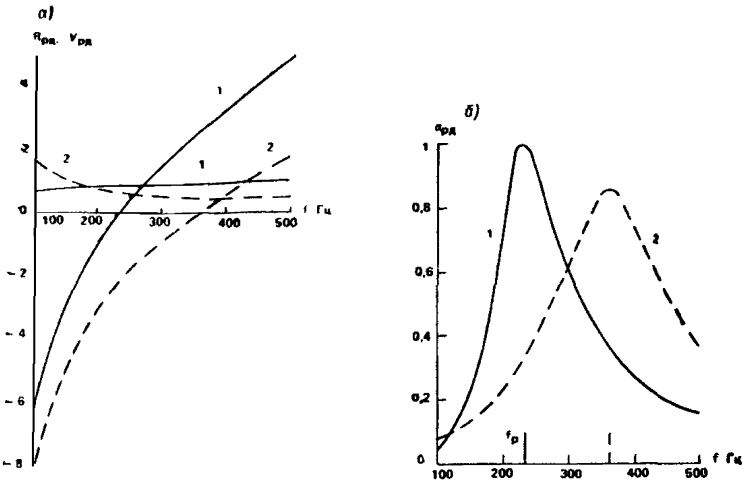


Рис. 7. Частотные зависимости импеданса $R_{рд}$, $Y_{рд}$ (*а*) и коэффициента звукопоглощения $\alpha_{рд}$(*б*) двухслойного резонатора без ткани

1 — при глубине зазора $l=0{,}14$ см, *2* — то же, с тканью ЭЗ-100 при $l=1$ см

ном резонаторе. При $R_{рд}=\Delta R=0{,}87$ определяют по формуле (3) коэффициент звукопоглощения $\alpha_{рд}=0{,}59$.

Результаты расчета импеданса и коэффициента звукопоглощения на других частотах в диапазоне 100—500 Гц приведены в табл. 3 и представлены графически на рис. 7, из которого следует, что резонансная частота двухслойной конструкции равна 230 Гц.

Таблица 3

f, Гц	$\sqrt{f}$	y	ΔR	ξ	δ_l	$Y_э$	$Y_с$	$Y_п$	$R_{рд}$	$Y_{рд}$	$\alpha_{рд}$
100	10	10	0,637	0,77	4,3	1,18	2,36	—9,1	0,637	—6,74	0,05
150	12,2	12,2	0,68	1,15	3,5	1,52	3,04	—6	0,68	—2,96	0,23
200	14,1	14	0,8	1,54	3	1,82	3,64	—4,5	0,8	—0,86	0,8
250	15,8	15,7	0,82	1,92	2,7	2,1	4,2	—3,7	0,82	0,5	0,92
300	17,3	17,2	0,87	2,3	2,35	2,3	4,6	—3,05	0,87	1,55	0,59
400	20	19,8	0,96	3,08	2	2,76	5,52	—2,13	0,96	3,39	0,25
500	22,5	22,5	1,04	3,84	1,8	3,22	6,44	—1,63	1,04	4,81	0,15

Пунктирными линиями на том же графике представлены результаты расчета величин $R_{рд}$, $Y_{рд}$ и $\alpha_{рд}$ для двухслойного резонатора с тканью ЭЗ-100 (см. пример 1) при достаточно большой глубине зазора между экранами $l=1$ см, когда выполняется ус-

ловие $\delta = \delta$. В этом случае резонансная частота равна 360 Гц. Таким образом, уменьшение зазора между двумя экранами от значения 1 до 0,14 см приводит к снижению величины f_p от 360 до 230 Гц.

3.3. Если в резонаторе используются три экрана и более, величины $R_{рт}$ и $Y_{рд}$ вычисляют по аналогии с примером 3, п. 3.2. с учетом следующих выражений:

$$\Delta R = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta R_i \; ; \qquad Y_c = \sum_{i=1}^{n} Y_{эi} \; ;$$

где n — число экранов в резонаторе; импеданс $Y_{эi}$ экрана вычисляют по формуле (24) для крайних экранов, а для внутренних — согласно равенству

$$Y_{эi} = k\,(l_{эi} + \delta_{l1} + \delta_{l2})\,/\eta_{эi},$$

где δ_{l1} и δ_{l2} — концевые поправки с двух сторон экрана, определенные в соответствии с требованиями п. 3.2.

Многослойные резонаторы рекомендуется применять для селективного поглощения звуковой энергии в низкочастотном диапазоне 100—200 Гц при условиях: $\eta_э \leqslant 0{,}1$ и $D_0 \geqslant 2$ см.

3.4. Для обеспечения заданного значения резонансной частоты двухслойного резонатора с двумя одинаковыми экранами диаметр отверстия выбирают по аналогии с однослойным резонатором (п. 2.3) путем графического решения уравнения (16) с помощью номограмм, представленных на рис. 6 и рис. 1, *а — в* прил. 6.

Для определения величины D_0 в точке $f = f_p$ оси абсцисс восстанавливают перпендикуляр до пересечения с пунктирной кривой с фиксированным индексом L. Тогда индекс функции Y_c, проходящей через данную точку, соответствует диаметру отверстия перфорированного экрана.

4. РАСЧЕТ ИМПЕДАНСА И КОЭФФИЦИЕНТА ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ РЕЗОНАТОРОВ, СВЯЗАННЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО

4.1. Однослойные и двухслойные резонансные поглотители, рассмотренные в разд. 2 и 3, имеют, как правило, узкополосное поглощение в низкочастотном диапазоне. Селективность таких резонаторов может быть существенно снижена при использовании не одного поглотителя, а цепочки резонаторов, соединенных последовательно друг с другом, как показано на схеме рис. 8, *а, б*.

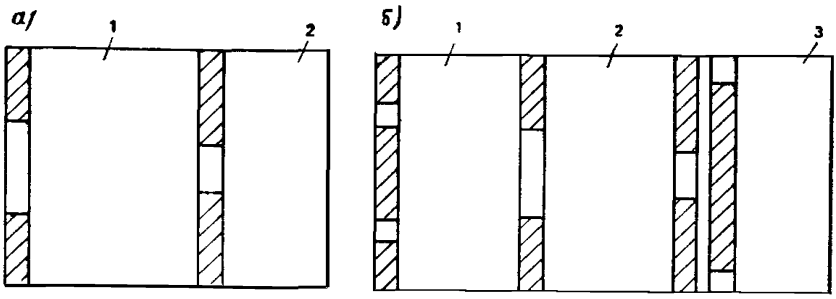


Рис. 8. Схемы цепочки резонаторов с последовательной связью
а — система из двух однослойных резонаторов; *б* — то же, из трех резонаторов; *1* — первый резонатор; *2* — второй резонатор; *3* — третий двухслойный резонатор

4.2. Для системы, состоящей из двух резонаторов (см. рис. 8, *а*) с параметрами D_{01}, $\eta_{э1}$, $l_{э1}$, L_1 — для первого резонатора и D_{02}, $\eta_{э2}$, $l_{э2}$, L_2 — для второго резонатора, импеданс $Z_{рс} = R_{рс} + jY_{рс}$ вычисляют согласно выражению

$$Z_{рс} = R_{рс} + jY_{рс} = R_{р1} + jY_{р1} + R + jY, \qquad (29)$$

где $R = R_{р2}(Y_{р1} - Y_{э1})^2 / M$;

$$Y = -(Y_{р2} + Y_{р1} - Y_{э1})(Y_{р1} - Y_{э1})^2 / M;$$

$$M = R^2_{р2} + (Y_{р2} + Y_{р1} - Y_{э1})^2;$$

$R_{р1}$, $R_{р2}$, $Y_{р1}$, $Y_{р2}$ — действительные и мнимые компоненты импеданса первого и второго резонатора соответственно, вычисляемые по равенствам (10) и (12), $Y_{э1}$ — инерционный импеданс перфорированного экрана первого резонатора, рассчитываемый по формуле (13).

4.3. Для системы, состоящей из трех последовательно соединенных резонаторов (см. рис. 8, *б*), импеданс рассчитывают также по формуле (29) с учетом того, что величины $R_{р2}$ и $Y_{р}$ вычислены предварительно по той же формуле для системы из второго и третьего резонатора.

4.4. Резонансные частоты $f_{р1}$, $f_{р2}$,... каждого отдельного резонатора в цепочке должны удовлетворять следующему требованию:

$$f_{р1} = (1{,}5—2)\, f_{р2} = (3—4)\, f_{з} = \cdots$$

Самый последний резонатор настраивают на самую низкую резонансную частоту, а первый резонатор должен иметь самую высокую резонансную частоту.

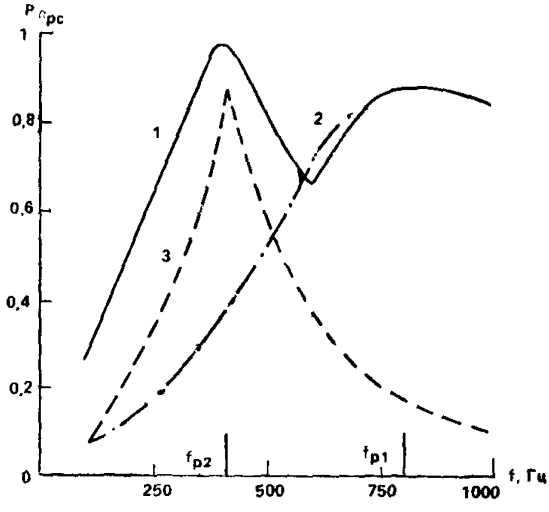


Рис. 9. Частотная зависимость коэффициента звукопоглощения α_{pc} системы

1 **— из двух однослойных резонаторов с последовательной связью;** ***2*** **— для первого резонатора с частотой f_{p1}= 800 Гц;** ***3*** **— для второго резонатора с частотой f_{p2}=410 Гц**

Частотная зависимость коэффициента звукопоглощения, вычисленная по формуле (3) с учетом равенства (29), в общем случае представляет собой огибающую всех частотных характеристик величины α_{pi} для каждого резонатора, как это показано на рис. 9.

Пример 4. Требуется рассчитать в частотном диапазоне 100—1000 Гц импеданс и коэффициент звукопоглощения системы, состоящей из двух последовательно соединенных резонаторов. Параметры первого резонатора: $D_{01} = 2$ см; $\eta_{э1} = 0{,}35$; $l_{э1} = 0{,}1$ см; $L_1 = 6$ см; резонансная частота $f_{p1} = 800$ Гц при использовании ткани Э3-100. Второй резонатор с резонансной частотой $f_{p2} = 410$ Гц описан в примере 1.

Расчет проводится на частоте 300 Гц с использованием данных табл. 1.

Вычисляют, согласно равенствам (13) и (12), соответственно величины $Y_{э1} = 0{,}093$ и $Y_{p1} - Y_{э1} = -2{,}75$; величину $Y_{p2} + (Y_{p1} - Y_{э1}) = (-1{,}52) + (-2{,}75) = -4{,}27$; величину $M = 0{,}28 + 18{,}3 = 18{,}58$; величины $R = 0{,}21$ и $Y = 1{,}74$; согласно формуле (29) — действительную компоненту $R_{pc} = 0{,}53 + 0{,}21 = 0{,}74$ и мнимую компоненту $Y_{pc} = -2{,}66 + 1{,}74 = -0{,}92$ импеданса системы двух резонаторов; согласно выражению (3) — коэффициент звукопоглощения $\alpha_{pc} = 0{,}76$.

4.5. Результаты расчета величин R_{pc}, Y_{pc} и α_{pc} системы двух резонаторов с последовательной связью приведены в табл. 4 для частотного диапазона 100—1000 Гц.

На рис. 9 представлена частотная зависимость коэффициента

Таблица 4

f, Гц	$Y_{p1}-Y_{эл}$	$(Y_{p1}-Y_{эл})^2$	R_{p2}^2	$Y_{p2}+(Y_{p1}-Y_{эл})$	M	Y_{p1}	R	Y	R_{pc}	Y_{pc}	α_{pc}
100	−9	81	2,2	−17,6	310	−9	0,38	4,6	1,84	−4,4	0,27
200	−4,27	18,3	0,52	−7,72	60	−4,2	0,22	2,3	0,94	−1,9	0,51
300	−2,75	7,6	0,28	−4,27	18,6	−2,66	0,21	1,74	0,74	−0,92	0,76
400	−1,77	3,14	0,2	−1,9	3,8	−1,65	0,35	1,57	0,79	−0,08	0,98
500	−1,22	1,48	0,17	−0,39	0,32	−1,07	1,9	1,8	2,32	0,73	0,81
600	−0,81	0,66	0,19	0,84	0,88	−0,62	0,32	−0,63	0,76	−1,25	0,65
800	−0,25	0,06	0,23	2,75	7,78	0	0	0	0,48	0	0,88
1000	0,17	0,03	0,31	4,44	20	0,5	0	0	0,56	0,5	0,83

звукопоглощения рассмотренной системы. Пунктирными линиями на том же графике показаны частотные характеристики величин α_{p1} и α_{p2} для каждого резонатора в отдельности.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Физико-технические параметры стеклянных тканей

Материал и марка	ГОСТ или ТУ	$m \cdot 10^{-4}$, г/см²	$l_{тк}$, см	$d_н \cdot 10^{-4}$, см	N	σ
Стеклянная ткань:						
А-1	ГОСТ 8481—75	70	0,01	400	18	0,2
Э6-2П	ГОСТ 19907—83	70	0,01	400	19	0,3
Э4-25	ГОСТ 19907—83	30	0,008	400	17	0,04
Э4-62	ГОСТ 19907—83	60	0,008	400	17	0,17
ТСГ-6	ТУ 6-11-118-75	70	0,007	300	19	0,2
ТСТ-7	ТУ 6-11-118-75	64	0,01	350	17	0,2
Стеклобумага БМД	ТУ 6-11-484-79	20	0,005	—	—	0,05
То же	ТУ 6-11-484-79	40	0,05	—	—	0,07
Полотно нетканое	ТУ 17-РСФСР-52-9814-80	60	0,01	—	—	0,2
Стеклянная ткань:						
Э3-100	ГОСТ 19907—83	108	0,01	400	18	0,62
Э4-176	ГОСТ 19907—83	88	0,008	400	15	0,46
Э3-125	ГОСТ 19907—83	146	0,01	500	16	0,77
ТСТ-3	ТУ 6-11-118-75	160	0,01	600	17	0,36
ТСТ-4	ТУ 6-11-118-75	120	0,01	600	20	0,64
ТСТ-9	ТУ 6-11-118-75	116	0,01	450	16	0,5
ТСТ-12	ТУ 6-11-118-75	210	0,017	700	6	0,3

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Формулы для расчета концевой поправки к толщине перфорированного экрана с отверстиями различной формы

Концевая поправка δ (п. 2.1) к толщине перфорированного экрана с коэффициентом перфорации $\eta_э$ при различной форме отверстий может быть рассчитана согласно следующим выражениям:

для круглого отверстия в круглой ячейке

$$\delta = 0{,}425\, D_0 (1 - 1{,}41\sqrt{\eta_э} + 0{,}338\eta_э + 0{,}067\eta_э^2\sqrt{\eta_э}),$$

где $\eta_э = D_0^2 / D^2$, D_0, D — диаметры отверстия и ячейки, см, соответственно;

для квадратного отверстия в квадратной ячейке

$$\delta = 0{,}445\, a\,(1 - 1{,}47\sqrt{\eta_э} + 0{,}47\,\eta_э\sqrt{\eta_э}),$$

где $\eta_э = a^2/в^2$; a, $в$ — стороны отверстия и ячейки, см. соответственно;

для щели в квадратной ячейке

$$\delta = \sqrt{2}\, a\, \ln(\sin 0{,}5\,\pi\,\eta_э)/\pi,$$

где $\eta_э = a/в$; a — ширина щели, см.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Угловая зависимость импеданса воздушной полости резонатора

При наклонном падении звуковой волны под углом θ на резонансный поглотитель, в воздушной полости которого имеются перегородки с шагом $b < \lambda_p/4$, где λ_p — длина звуковой волны на резонансной частоте, импеданс воздушной полости $Y_п^\theta$ (п. 2.1) вычисляют согласно следующей формуле:

$$Y_п^\theta = \cos\theta\,(\operatorname{ctg} kL),$$

где L — глубина воздушной полости, см.

Если в воздушном промежутке за перфорированным экраном отсутствуют перегородки, то величину $Y_п^\theta$ следует рассчитывать согласно следующему выражению:

$$Y_п^\theta = \operatorname{ctg}(kL\cos\theta).$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Расчет импеданса и коэффициента звукопоглощения однослойного резонатора, воздушная полость которого заполнена волокнистым материалом

При заполнении воздушной полости резонатора (пп. 2.1—2.2) волокнистым звукопоглощающим материалом для расчета импеданса системы используют следующие равенства:

$$R_р = R_{сл} + \sigma; \qquad (1)$$

$$Y_p = Y_э + Y_{сл} + Y_{тк}; \qquad (2)$$

где $R_{сл}$ и $Y_{сл}$ — действительная и мнимая компоненты импеданса слоя волокнистого материала толщиной $l_{сл}$, см; σ — сопротивление продуванию ткани, вычисляемое согласно п. 2.1; $Y_{тк}$ — инерционный импеданс ткани, используемой как защитное покрытие к слою поглотителя; $Y_э$ — импеданс экрана (п. 2.1).

В соответствии с «Рекомендациями по расчету и проектированию звукопоглощающих облицовок» (М.: Стройиздат, 1984) импеданс слоя волокнистого материала, расположенного на жестком основании, определяют по формуле

$$R_{сл} + j\,Y_{сл} = (1 + Q - jQ)\ \mathrm{cth}\ kl_{сл}[Q(2+Q)/(1+Q) + j(1+Q)], \qquad (3)$$

где Q — структурная характеристика волокнистого материала плотностью ρ, кг/м^3, и диаметром волокна d, мкм, которую рассчитывают согласно выражению

$$Q = (q + q_0)/\sqrt{kd}, \qquad (4)$$

где $q = 10^2\rho/\rho_0$ — приведенная плотность, равная отношению плотности материала к плотности воздуха; $q_0 = (10q^2 + 0{,}5q^{-1} + 0{,}5k^2d^4h^{-2})^{-1}$ поправка, учитывающая влияние гибкости скелета материала на его акустические свойства; h — длина волокна, см.

На рис. 1 и 2 данного приложения представлены номограммы для определения величин $R_{сл}$ и $Y_{сл}$ по известным значениям переменных Q и $kl_{сл}$. Более точный расчет импеданса слоя волокнистого материала может быть проведен с помощью ЭВМ по программе, приведенной в прил. 2 ранее указанных Рекомендаций.

Выражением (3), а также номограммами рекомендуется пользоваться при условии $kd > 0{,}3$, где величина d принимается в микронах.

Если $kd < 0{,}3$, что справедливо для ультратонких волокнистых материалов, диаметр волокон которых меньше 2 мкм, то импеданс слоя поглотителя вычисляют согласно следующему выражению:

$$R_{сл} + jY_{сл} = (1 + Q - jA_1Q)\ \mathrm{cth}\ kl_{сл}\,[QA_2\,(2+Q)/(1+Q) + jA_3(1+Q)], \qquad (5$$

где коэффициенты $A_1 A_2$ и A_4 в зависимости от параметра kd определяют из графика рис. 3 данного приложения.

Использование тонковолокнистых материалов для заполнения воздушной полости резонатора позволяет существенно снизить резонансную частоту при тех же габаритах конструкции, как показано на примере расчета, приведенном ниже.

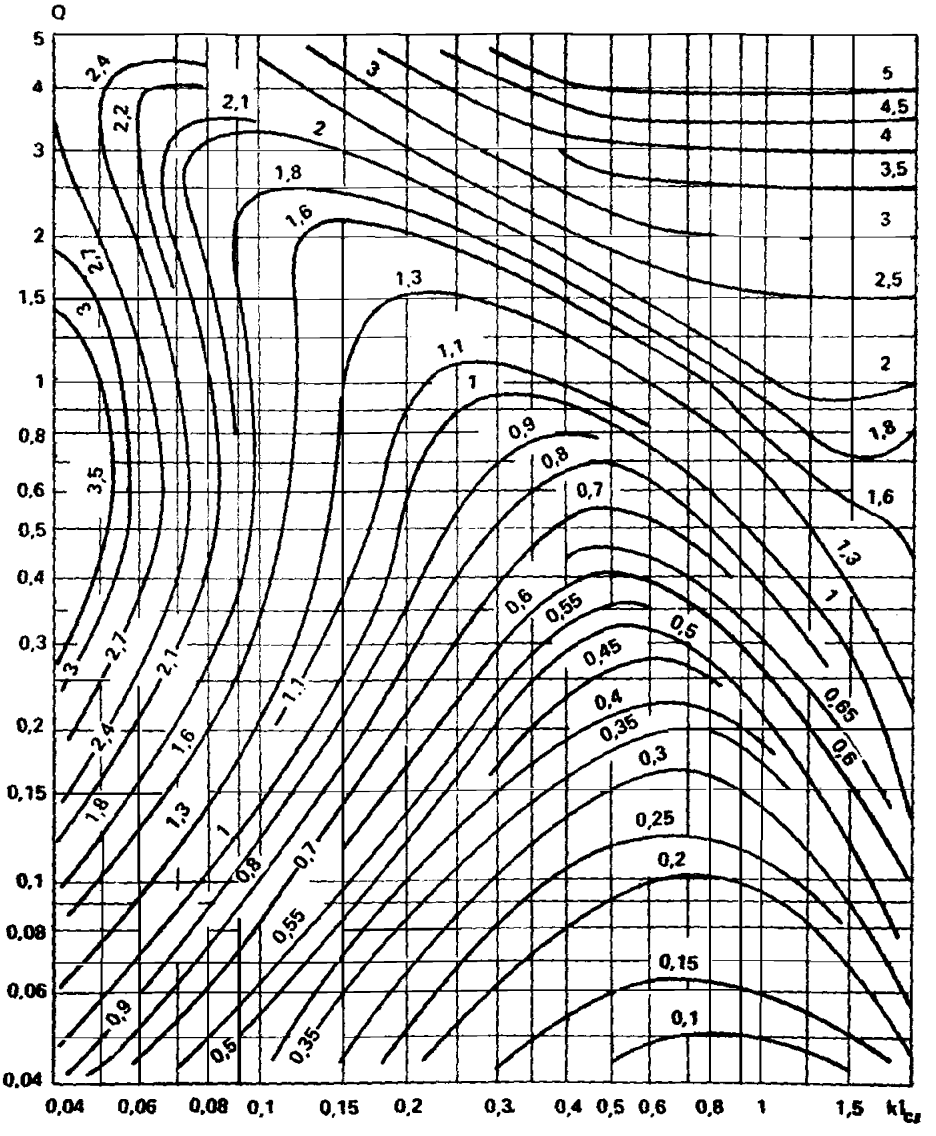


Рис. 1. Номограмма для определения действительной компоненты $R_{сл}$ импеданса при нормальном падении звуковой волны на слой волокнистого материала, расположенный на жестком основании

Реактанс $Y_{тк}$ ткани может быть рассчитан согласно выражению

$$Y_{тк} = \xi_{тк} - 0{,}1\,\xi_{тк} + 0{,}01\,\xi_{тк}^3,$$

где переменную $\xi_{тк}$ вычисляют по физико-техническим параметрам ткани из равенства

$$\xi_{тк} = (1+\sigma^2)(mk\,a/4\,\rho_0).$$

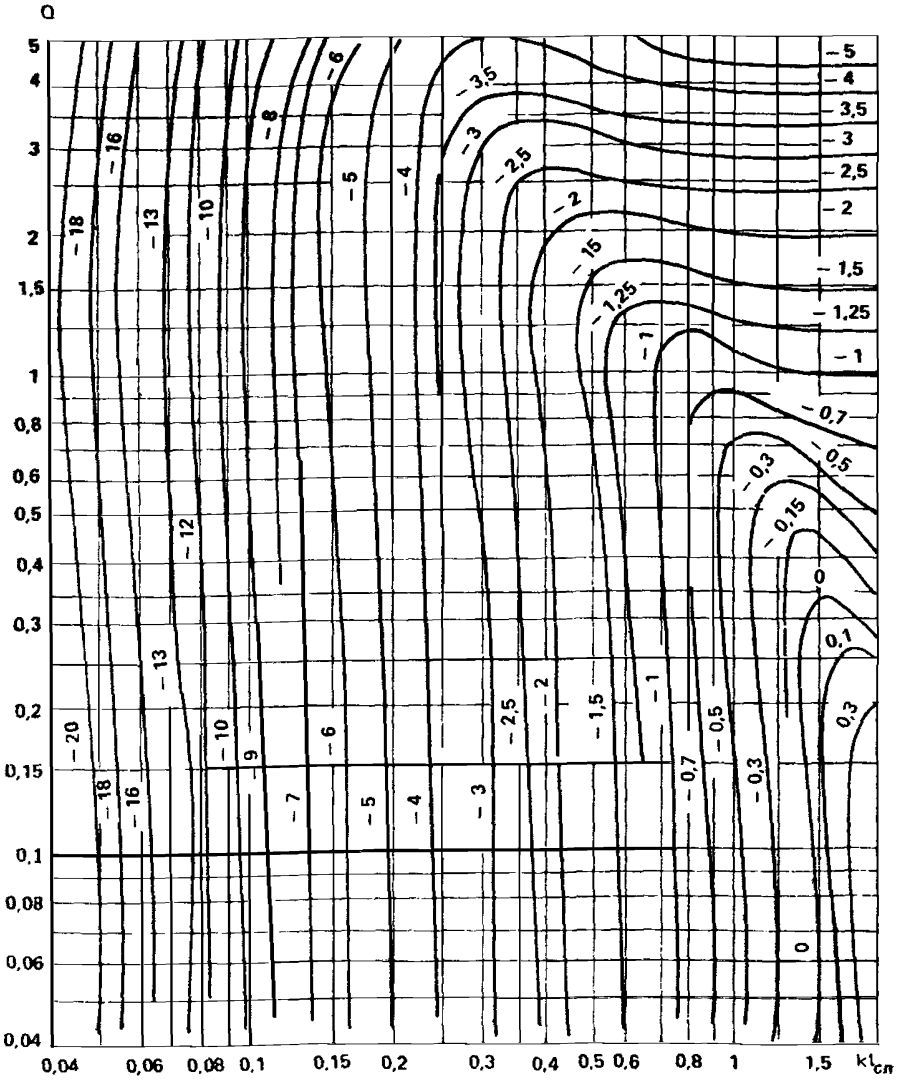


Рис. 2. Номограмма для определения мнимой компоненты $Y_{сл}$ импеданса при нормальном падении звуковой волны на слой волокнистого материала, расположенный на жестком основании

Поскольку активные потери звуковой энергии в резонаторе обеспечиваются самим волокнистым поглотителем, то защитное покрытие рекомендуется выбирать легким, с поверхностной массой 0,0075 г/см² так, чтобы влияние величин σ и $Y_{тк}$ на импеданс резонатора было минимальным ($\sigma \leqslant 0{,}2$, см. прил. 1).

Пример. Требуется рассчитать в частотном диапазоне 100—1000 Гц импеданс Z_p и коэффициент звукопоглощения α_p одно-

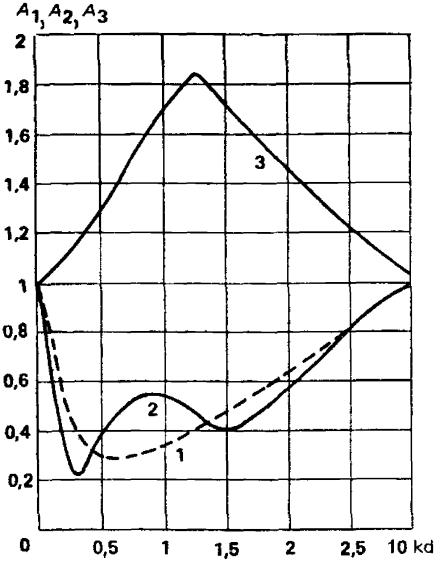


Рис. 3. Зависимость коэффициентов A_1, A_2, A_3 от переменной kd
***1, 2, 3* — кривые**

слойного резонатора, описание которого дано в примере 1 (п. 2.1), с воздушной полостью, заполненной полностью:

а) слоем минеральной ваты (ТУ 21-24-51-73) плотностью $\rho=90$ кг/м³, диаметром волокна $d=8$ мкм и длиной волокна $h=4$ см;

б) слоем базальтового волокна (РСТ УССР 5013-76) плотностью $\rho=20$ кг/м³, с диаметром волокна $d=1$ мкм.

В качестве защитного покрытия использована стеклоткань ТСТ-6 с физико-техническими параметрами, приведенными в прил. 1.

Вариант 1. Согласно равенству (4), вычисляют величину $Q\sqrt{k}=(q+q_0)/\sqrt{d}=(0{,}73+0{,}167)/2{,}83=0{,}32$ (без учета частотной зависимости величины q_0). Последующим делением полученного значения на $\sqrt{k}$ рассчитывают структурную характеристику Q минеральной ваты на любой заданной частоте.

При $l_{сл}=L=6$ см вычисляют переменную $kl_{сл}$, затем по номограммам рис. 1 и 2 данного приложения в точке с заданными координатами (Q, $kl_{сл}$) определяют величины $R_{сл}$ и $Y_{сл}$. Так, для частоты 100 Гц: $k=0{,}0183$; $\sqrt{k}=0{,}135$; $Q=0{,}32/0{,}135=2{,}35$; $kl_{сл}=0{,}11$; величины $R_{сл}=1{,}7$ и $Y_{сл}=-8{,}5$. При $\alpha=0{,}2$ для ткани ТСТ-6 действительная компонента импеданса резонатора будет равна $R_р=1{,}9$. Для расчета величины $Y_р$, согласно (2), используют численные значения $Y_э$, приведенные в примере 1 п. 2.1, $Y_р=-8{,}5+0{,}41=-8{,}1$. Величиной $Y_{тк}$ в расчетах пренебрегают. Коэффициент звукопоглощения $\alpha_р=0{,}11$ определяют согласно формуле (3) п. 1.2.

Таблица 1

f, Гц	Q	$kl_{сл}$	$R_{сл}$	$Y_{сл}$	$Y_э$	$R_р$	$Y_р$	$\alpha_р$
100	2,35	0,11	1,7	−8,5	0,41	1,9	−8,1	0,11
200	1,07	0,22	1,35	−4	0,82	1,55	−3,2	0,36
300	1,36	0,33	1,25	−2,5	1,23	1,45	−1,27	0,76
400	1,18	0,44	1,2	−1,7	1,63	1,4	−0,07	0,97
500	1,05	0,55	1,25	−1,25	2,05	1,45	0,8	0,87
600	0,97	0,66	1,3	−1,0	2,46	1,5	1,46	0,72
800	0,84	0,88	1,4	−0,65	3,26	1,6	2,6	0,47
1000	0,7	1,1	1,6	−0,45	4,1	1,8	3,65	0,34

Аналогичные вычисления проводят для других значений частот в интервале 100—1000 Гц. Результаты расчета приведены в табл. 1 прил. 4.

Как видно из анализа данных табл. 1 прил. 4, резонансная частота системы равна 400 Гц. То же значение $f_р$ получилось ранее в примере 1 (вариант 2) п. 2.1. для резонатора с воздушной полостью и тканью Э3-100. Из сравнения частотных зависимостей величины $\alpha_р$ для обоих резонаторов следует, что слой материала приводит к увеличению коэффициента звукопоглощения в диапазоне частот выше значения $f_р$.

Таблица 2

Гц	Q	$kl_{сл}$	A_1	A_2	$A_э$	$R_{сл}$	$Y_{сл}$	$Y_э$	$R_р$	$Y_р$	$\alpha_р$
100	3,4	0,11	0,55	0,4	1,1	0,72	−5,73	0,41	0,92	−5,32	0,11
200	2,36	0,22	0,35	0,22	1,2	0,49	−2,4	0,82	0,69	−1,58	0,51
300	1,94	0,33	0,3	0,4	1,34	1,33	−0,6	1,23	1,53	0,63	0,9
400	1,7	0,44	0,3	0,52	1,5	2,4	0,85	1,63	2,6	2,48	0,54
500	1,5	0,55	0,36	0,56	1,6	3,75	1,5	2,05	3,95	3,55	0,42
600	1,38	0,66	0,38	0,53	1,75	5,47	0,64	2,46	5,67	3,1	0,41
800	1,18	0,88	0,48	0,4	1,75	2	−3	3,26	2,2	0,26	0,85
1000	1,07	1,1	0,6	0,5	1,54	3,46	−1,78	4,1	3,66	2,32	0,64

Вариант 2. Расчет проводят для частоты 100 Гц. Согласно формуле (4) вычисляют структурную характеристику базальтового волокна $Q = (0{,}162+0{,}295)/0{,}135=3{,}4$; переменные $kl_{сл}=0{,}11$ и и $kd = 0{,}0183$. Из графика рис. 3 прил. 4 определяют коэффициенты $A_1=0{,}55$; $A_2=0{,}4$; $A_3=1{,}1$ при $kd=0{,}0183$. Рассчитывают $R_{сл}=0{,}72$ и $Y_{сл}=-5{,}73$ согласно формуле (5) с использова-

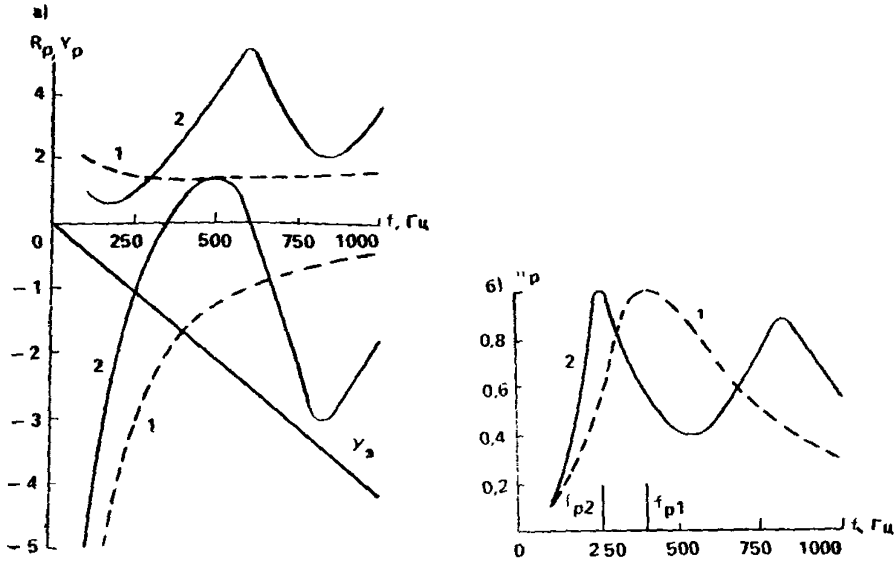


Рис. 4. Частотные зависимости импеданса R_p, Y_p (*а*) и коэффициента звукопоглощения α_p (*б*) однослойного резонатора с полостью, заполненно волокнистым материалом

1 — минеральная вата; *2* — базальтовое волокно

нием программы (см. прил. 2 «Рекомендаций по расчету и проектированию звукопоглощающих облицовок». — М.: Стройиздат, 1984).

Импеданс резонатора $Z_p = R_p + jY_p$ и коэффициент звукопоглощения α_p определяют по аналогии с вариантом 1: R_p = =0,72+0,2=0,92; Y_p =—5,73+0,41=—5,32 и α_p=0,11. Результаты расчета для других значений частоты в диапазоне 100—1000 Гц даны в табл. 1 прил. 4 и представлены графически на рис. 4. Там же пунктиром показаны частотные зависимости импеданса и коэффициента звукопоглощения резонатора с минеральной ватой (вариант 1).

Из сравнения кривых следует, что использование базальтового волокна в качестве заполнителя воздушной полости резонатора приводит к снижению резонансной частоты от 400 до 270 Гц при сравнительно небольшой толщине слоя, равной 6 см.

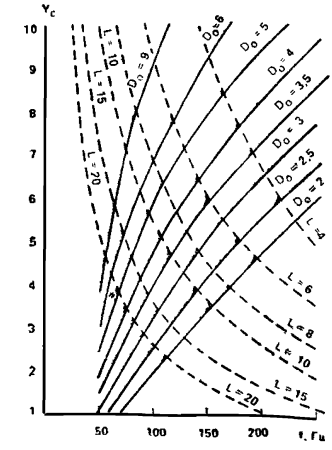
ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Параметры однослойного резонатора с тканью Э3-100, настроенного на заданную резонансную частоту

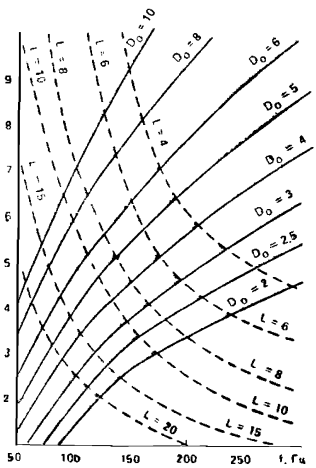
Резонансная частота, Гц	Глубина полости, см	Параметры экрана				
		толщина, см	коэффициент перфорации	шаг перфорации, см	диаметр отверстия, см	концевая поправка, см
125	15	1	0,05	37,5	9,4	2,5
125	15	0,5	0,05	41	10	2,7
150	15	1	0,06	27,4	7,6	1,9
150	15	0,5	0,06	30	8,5	2,14
150	15	0,1	0,06	34	9,4	2,35
150	15	1	0,05	25	6,4	1,7
150	15	0,5	0,05	29	7,4	1,96
150	10	0,5	0,05	43,5	11	1,25
175	15	1	0,05	18	5	1,17
175	15	0,5	0,06	20	5,6	1,42
175	15	0,1	0,06	23	6,4	1,63
175	15	1	0,06	32	8,8	2,22
200	10	0,5	0,06	23	6,9	1,74
200	10	0,1	0,06	26	7,6	1,95
200	15	1	0,06	9,5	2,6	1
200	15	0,5	0,06	14	4	1,25
200	15	0,1	0,06	18	4,9	1,9
200	8	0,5	0,06	33	9,1	2,35
200	8	0,5	0,05	28,6	7	1,87
225	15	0,1	0,07	13,4	4	1
225	15	0,1	0,06	11,8	3,3	0,83
225	10	0,1	0,06	20	5,9	1,45
225	10	1	0,06	13,4	4	1
225	10	0,5	0,07	17,2	5,1	1,25
225	8	0,5	0,07	26,6	8,2	2
225	8	0,5	0,06	25	6,9	1,73
250	15	0,1	0,06	9,2	2,55	0,64
250	15	1	0,06	2,7	0,75	0,19
250	15	0,5	0,07	7,7	2,3	0,56
250	15	0,5	0,08	9,1	2,9	0,69
250	15	0,5	0,09	10,2	3,45	0,78
250	10	0,1	0,09	22	7,6	1,8
250	10	0,5	0,09	21	7,1	1,6
250	10	0,5	0,07	16	4,8	1,16
250	8	0,5	0,07	21,8	6,5	1,6
250	8	0,5	0,06	19,2	5,35	2,37
250	8	0,5	0,08	24	7,7	1,85
250	6	0,5	0,07	28	8,5	2,06
300	10	0,5	0,07	9,1	2,7	0,67
300	10	0,1	0,07	12	3,5	0,87
300	10	0,5	0,08	10,4	3,3	0,78
300	10	0,1	0,09	15	5,1	1,15
300	8	0,1	0,07	15,2	4,7	1,16
300	8	0,5	0,07	12,7	3,8	0,98
300	6	0,1	0,07	15	4,5	1,1
300	6	0,5	0,07	12,4	3,7	0,93
300	6	0,5	0,09	16,8	5,7	1,26
350	8	0,5	0,09	10,7	3,6	0,82
350	8	0,5	0,08	9,1	2,9	0,69
350	8	0,1	0,08	11,8	3,75	0,89
350	6	0,1	0,07	15	4,5	1,13
350	6	0,5	0,07	12,4	3,7	0,93
350	6	0,5	0,09	16,8	5,7	1,26

Номограмма для определения инерционного импеданса системы двух одинаковых перфорированных экранов

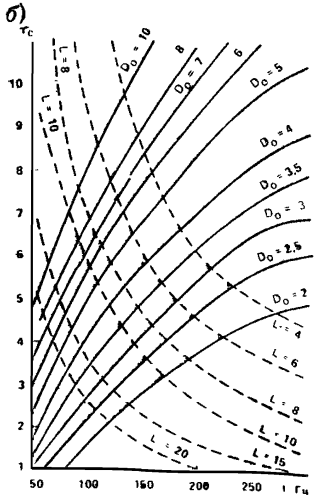
а)



в)



б)



Номограмма для определения инерционного импеданса системы двух одинаковых экранов толщиной $l_э$=0,1 см, расположенных с зазором l=0,15 δ см

***а* — при $\eta_э$=0,07; *б* — при $\eta_э$=0,08; *в* — при $\eta_э$=0,09**

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
1. Резонансный поглотитель звука. Акустические характеристики 4
2. Расчет импеданса и коэффициента звукопоглощения однослойного резонатора 7
3. Расчет импеданса и коэффициента звукопоглощения двухслойного резонатора 13
4. Расчет импеданса и коэффициента звукопоглощения резонаторов, связанных последовательно 19
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Физико-технические параметры стеклянных тканей 23
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Формулы для расчета концевой поправки к толщине перфорированного экрана с отверстиями различной формы 23
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Угловая зависимость импеданса воздушной полости резонатора 24
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Расчет импеданса и коэффициента звукопоглощения однослойного резонатора, воздушная полость которого заполнена волокнистым материалом 24
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Параметры однослойного резонатора с тканью ЭЗ-100, настроенного на заданную резонансную частоту 31
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Номограмма для определения инерционного импеданса системы двух одинаковых перфорированных экранов 32

Нормативно-производственное издание
НИИСФ Госстроя СССР

ПОСОБИЕ ПО РАСЧЕТУ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ МНОГОСЛОЙНЫХ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ СИСТЕМ (конструкций)
(к СНиП II-12-77)

Редакция инструктивно-нормативной литературы

Зав. редакцией *Л. Г. Бальян*
Редактор *И. А. Баринова*
Мл. редактор *И. В. Машеро*
Технический редактор *Е. Л. Сангурова*
Корректор *Т. Г. Бросалина*

Н/К

Сдано в набор 20.02.87. Подписано в печать 15.06.87. Т-11653
Формат 84×108$^{1}/_{32}$. Бумага тип. № 2. Гарнитура «Литературная».
Печать высокая. Усл. печ. л. 1,68. Усл. кр.-отт. 1,99. Уч.-изд. л. 1,74.
Тираж 10 000 экз. Изд. № XII-2125. Заказ 101. Цена 10 коп.

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а

кое производственное объединение «Полиграфист», 509281, г. Калуга, пл Ленина, 5

gost.e-ecolog.ru