НИИСФ Госстроя СССР

Рекомендации

по расчету и проектированию звукопоглощающих облицовок



Москва 1984

gost.e-ecolog.ru

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ (НИИСФ)
ГОССТРОЯ СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ

по расчету и проектированию звукопоглощающих облицовок



Москва Стройиздат 1984

УДК 691:693.69:699.844.001.24

Рекомендовано к изданию решением Научно-технического совета НИИ строительной физики Госстроя СССР.

Рекомендации по расчету и проектированию звукопоглощающих облицовок / НИИСФ. — М.: Стройиздат, 1984. — 53 с.

Изложены принципы расчета и проектирования плоских звукопоглощающих облицовок, применяемых для снижения уровня шума в производственных помещениях.

Приведен метод расчета частной зависимости коэффициента звукопоглощения слоя волокнистого звукопоглощающего материала в сочетании с защитными покрытиями (тканью, пленкой, перфорированным экраном); даны номограммы для определения импеданса всех компонентов облицовки по их физическим характеристикам.

Для инженеров-акустиков и проектировщиков, занимающихся расчетом и проектированием звукопоглощающих конструкций.

Табл. 9, ил. 33.

Р $\frac{3202000000-392}{047(01)-84}$ Инструкт.-нормат., II вып.—62—83

© Стройиздат, 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ

В связи с широким применением звукопоглощающих волокнистых и пористых материалов для снижения шума в промышленных и общественных зданиях повышаются требования к точности количественной оценки их звукопоглощающих свойств.

В настоящих Рекомендациях излагается инженерный метод расчета импеданса и коэффициента звукопоглощения плоских акустических конструкций, состоящих, как правило, из слоя поглотителя в сочетании с защитными покрытиями, выполненными из ткани (пленки) и перфорированных экранов или сеток.

Даны рекомендации по выбору оптимальных параметров волокнистого звукопоглощающего материала, а также защитных покрытий, обеспечивающих заданную величину коэффициента звукопоглощения облицовки в заданном частотном диапазоне.

Приведены условия равноценной замены одного материала другим.

В основу Рекомендаций положены результаты многолетней научно-исследовательской работы, проведенной в лаборатории акустических конструкций НИИ строительной физики по изучению влияния структуры материалов на звукопоглощение.

Рекомендации разработаны НИИ строительной физики Госстроя СССР (канд. техн. наук Н. Н. Воронина).

1. АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

1.1. Основной величиной, характеризующей акустические свойства звукопоглощающих конструкций и облицовок, является коэффициент звукопоглощения α (КЗП), равный отношению поглощенной звуковой энергии к падающей.

Другой не менее важной характеристикой звукопоглощающей конструкции является акустический импеданс (сопротивление) Z_a, кгс/с·м², определяемый 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 $Z=Z_a/W_0$, где W_0 — волновое сопротивление воздуха, кгс/с·м².

Коэффициент звукопоглощения может быть рассчитан по известному значению импеданса согласно выражению

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z-1}{Z+1} \right|^2. \qquad (1)$$

Коэффициент звукопоглощения и импеданс облицовки являются функциями частоты звука, толщины слоя звукопоглощающего материала и конструкции, структурных особенностей этого материала, акустических свойств защитных покрытий, если таковые имеются, а также угла падения звуковой волны. Этот угол принимается равным углу между нормалями, проведенными к фронту падающей звуковой волны и к поверхности облицовки.

В диффузном звуковом поле помещения, в котором все углы падения волн равновероятны, а распределение плотности энергии является равномерным по всему объему, акустические свойства конструкции характеризуют статистическим (диффузным) коэффициентом звукопоглощения. С достаточно хорошим приближением можно считать его равным значению КЗП при наклонном падении плоской звуковой волны под углом 45°.

В настоящих Рекомендациях все выражения, предназначенные для расчета импеданса и коэффициента звукопоглощения конструкции, даны для произвольного значения угла падения.

Методика измерения импеданса и коэффициента звукопоглощения изложена в ГОСТ 16297—80 «Материалы звукоизоляционные и звукопоглощающие. Методы испытаний».

Значения коэффициентов звукопоглощения, определенные экспериментально для некоторых акустических конструкций и облицовок, приводятся, как правило, в справочниках и каталогах. Однако при проектировании эффективных и экономичных по расходу материалов звукопоглощающих конструкций таких сведений не достаточно. В отдельных случаях требуется расчет импеданса и КЗП конструкции с заданными параметрами. При расчете импеданса и КЗП используют акустические (волновые) параметры звукопоглощающих материалов.

1.2. Акустические параметры характеризуют звукопоглощающие свойства материала как среды. Основными параметрами являются волновое сопротивление W, отнесенное к волновому сопротивлению воздуха, и постоянная распространения γ, 1/см.

Волновое сопротивление (безразмерное) соответствует акустическому комплексному импедансу бесконечно протяженного слоя материала. Комплексная величина γ показывает, с какой амплитудой и скоростью распространяется звуковой процесс в среде.

Численные значения акустических параметров определяют либо экспериментально согласно методике, изложенной в «Руководстве по измерению и расчету акустических характеристик звукопоглощающих материалов» (М., Стройиздат, 1979), либо расчетом по физико-техническим характеристикам волокнистых или пористых материалов.

1.3. Волновое сопротивление и постоянная распространения могут быть рассчитаны по эмпирическим формулам:

$$W = 1 + Q_1 - jQ_2; \tag{2}$$

$$\gamma = \frac{kQ_2\,(2 + Q_2)}{1 + Q_1} + jk\,(1 + Q_1), \tag{3}$$

где $k = \dfrac{2\pi f}{c}$ — волновое число для воздуха, $см^{-1}$; f — частота звука, Гц; c — скорость звука в воздухе, см/с, численные значения которой в зависимости от температуры принимают согласно прил. 2 ГОСТ 16297—80; Q_1 и Q_2 — безразмерные структурные характеристики, связанные с физико-техническими константами звукопоглощающих материалов (плотностью, средним диаметром поры или волокна и др.) следующими количественными соотношениями: для жестких пористых материалов типа плит «силакпор» и пеногипса:

$$Q_1^{т} = \frac{q}{\sqrt{0,1kr}}; \tag{4}$$

$$Q_2^{т} = (Q_1^{т})^2\,(1 + Q_1^{т})^{-1}; \tag{5}$$

$$q = \frac{\rho 10^{-2}}{\rho_0}, \tag{6}$$

где q — приведенная плотность, пропорциональная отношению плотностей материала ρ, $кг/м^3$, и воздуха ρ_0, $кг/м^3$; r — средний радиус поры, мкм.

Для эластичных пористых материалов типа пенополиуретана и пенополивинилхлорида:

$$Q_1^{эл} = Q_1^{т} + q_{эл}; \tag{7}$$

$$Q_2^{эл} = Q_2^{т} + \frac{q_{эл}^2}{1 + q_{эл}}, \tag{8}$$

где $q_{эл} = \dfrac{5H}{r\rho\sqrt[3]{0{,}1kr}}$ — поправка, учитывающая влияние податливости скелета материала на его акустические свойства; H — напряжение при сжатии на 20%, кгс/см²; для волокнистых материалов, имеющих средний диаметр волокна d, мкм, и длину волокна h, см:

$$\text{при } kd > 0{,}1 \quad Q_1 = Q_2 = Q = \frac{q + q_0}{\sqrt{kd}}, \tag{9}$$

$$\text{при } kd \leqslant 0{,}1 \quad Q_2 = \frac{Q^2}{1 + Q}, \tag{10}$$

где величину q определяют согласно выражению (6), $q_0 = (10q^2 + 0{,}5q^{-1} + 0{,}5k^2d^4h^{-2})^{-1}$ — поправка, учитывающая влияние гибкости скелета материала на его акустические свойства.

Для расчета структурных характеристик и акустических параметров в соответствии с равенствами (2)—(10) в табл. 1 даны физические константы различных звукопоглощающих материалов отечественного производства.

В прил. 1 на рис. 1, *а*, *б*, *в*, *г*, *д* представлены частотные зависимости структурной характеристики $Q = Q_1$, рассчитанные согласно равенству (9) для некоторых волокнистых материалов в частотном диапазоне 63—8000 Гц. Для волокнистых материалов с очень тонкими волокнами, когда выполняется условие $kd \leqslant 0{,}1$, величину Q_2 вычисляют в соответствии с выражением (10) по численному значению Q, определенному из графика. При этом величину γ рассчитывают согласно равенству (3) с учетом условия $Q_1 = Q_2 = Q$.

2. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

2.1. При наклонном падении плоской звуковой волны под некоторым углом θ на звукопоглощающую конструкцию, состоящую из слоя пористого или волокнистого материала с защитными покрытиями в виде ткани (пленки) и перфорированного экрана, импеданс конструкции $Z_к$ равен сумме импедансов всех ее компонент

$$Z_к = Z_{сл} + Z_{тк} + Z_{эк}, \tag{11}$$

где $Z_{сл}$, $Z_{тк}$, $Z_{эк}$ — импедансы слоя материала, ткани и перфорированного экрана соответственно.

Коэффициент звукопоглощения вычисляют по величине суммарного импеданса согласно выражению (1).

Расчет импеданса слоя звукопоглощающего материала конечной толщины

2.2. В общем виде импеданс слоя звукопоглощающего материала конечной толщины l, см, расположенного либо вплотную к жесткому

основанию, либо на некотором расстоянии L, см, от него (на относе), рассчитывают согласно следующему равенству

$$Z_{сл} = R_{сл} + jY_{сл} = \frac{W^2\Psi^{-2}\cos^2\theta + Z_0 Z_{сл}^{\infty}}{Z_0 + Z_{сл}^{\infty}}, \qquad (12)$$

где $R_{сл}$, $Y_{сл}$ — действительная и мнимая компоненты импеданса $Z_{сл}$; $\Psi = (1 + k^2\gamma^{-2}\sin^2\theta)^{0,5}$; $Z_0 = \infty$—импеданс жесткого основания при $L=0$; $Z_0 = -j\,\mathrm{ctg}\,(kL\cos\theta)$— импеданс воздушного промежутка между слоем материала и жестким основанием при $L \neq 0$; $Z_{сл}^{\infty}$ — импеданс слоя, расположенного на жестком основании, вычисляемый по формуле

$$Z_{сл}^{\infty} = \frac{W\cos\theta}{\Psi}\,\mathrm{cth}\,(\gamma\Psi l).$$

При этом численные значения акустических параметров W и γ принимаются в соответствии с требованиями пп. 1.2 и 1.3.

В прил. 2 приведена программа ФОКАЛ расчета импеданса и коэффициента звукопоглощения слоя звукопоглощающего материала согласно равенствам (12) и (1) с учетом выражений (4)—(10) для структурных характеристик.

2.3. Импеданс и КЗП слоя волокнистого материала толщиной l, см, расположенного на жестком основании, определяют с помощью номограмм, представленных на рис. 1—3 в виде семейств кривых равных величин $R_{сл}$, $Y_{сл}$ и $\alpha_{сл}$ на плоскости двух безразмерных переменных Q и kl. Индексы кривых соответствуют численным значениям импеданса и коэффициента звукопоглощения. Номограммы построены в предположении $\theta = 45°$ и $kd > 0{,}1$. На стандартных среднегеометрических частотах октавных (или третьоктавных) полос вычисляют аргумент kl и структурную характеристику Q согласно выражению (9). Величины $R_{сл}$, $Y_{сл}$ и $\alpha_{сл}$ определяют по номограммам в точках с соответствующими координатами (Q, kl). Относительные погрешности в определении импеданса и коэффициента звукопоглощения при этом превышают 10 и 5% соответственно.

Пример 1. Требуется рассчитать в частотном диапазоне 125—4000 Гц импеданс $Z_{сл}$ и коэффициент звукопоглощения $\alpha_{сл}$ при наклонном падении звуковой волны под углом 45° на облицовку, состоящую из слоя супертонкого стекловолокна (ТУ 21-01-224-75) толщиной 2 см, расположенного на жестком основании. Плотность $\rho = 15$ кг/м^3, диаметр волокна $d = 2$ мкм, длина волокна $h = 8$ см приняты в соответствии с табл. 1.

Импеданс и КЗП определяют с помощью номограмм (рис. 1—3) на стандартных частотах 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Гц. Для примера проводится расчет этих величин на частоте 1000 Гц.

Вычисляют приведенную плотность $q = 0{,}12$ согласно (6), волновое число $k = 0{,}18$; $kd = kl = 0{,}36$; величину $q_0 = 0{,}23$ и структурную характеристику $Q = 0{,}58$ согласно равенству (9).

Таблица 1

Материал	ГОСТ, ТУ	Плотность ρ, кг/м³	Диаметр волокна (поры) d, мкм	Длина волокна h, см	Напряжение при сжатии на 20% H, кгс/см²	Температуростойкость, °С
1. ВОЛОКНИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ						
Ультратонкое штапельное базальтовое волокно	ТУ 550-2-44-72	15—20	0,6—1	1—2	—	От —200° до +700° С
Супертонкое штапельное базальтовое волокно	РСТ УССР 5013-76	20—25	1—2	1—2	—	От —200° до +700° С
Маты из супертонкого штапельного базальтового волокна марки АТМ-10с	ТУ 550-2-42-72	40—55	1—2	1—2	—	От —200° до +450° С
Ультратонкое штапельное стеклянное волокно марки М20-МТВ-0,4	ТУ 6-11-483-79	8—10	0,4	—	—	От —60° до +450° С
Супертонкое стеклянное щелочное волокно	ТУ 21-01-224-75	15—25	2—3	8—10	—	От —60° до +450° С
Ультратонкое и супертонкое щелочное стеклянное волокно	ТУ 18-16-151-70	8—10	1—2	10	—	От —60° до +450° С
Маты из ультратонкого и супертонкого стеклянного волокна марки АТМ-1 (со связующим)	ТУ 18-16-152-70	8—10	1—2	4—5	—	От —60° до +70° С
Маты из супертонкого штапельного волокна марки АТМ-3	ТУ 17-РСФСР-4218-70	20—40	2—3	40	—	От —60° до +450° С
Маты из супертонкого штапельного волокна марки АТИМС	ТУ 17-РСФСР-2164-70	70—80	5—7	40	—	От —60° до +450° С
То же, марки АТИМСС (со связующим)	ТУ 17-РСФСР-3919-70	25	5—7	4—5	—	От —60° до +150° С
То же, марки АСИМ	ТУ 21-01-336-70	10	5—7	40	—	От —60° до +450° С
Стеклянное бесщелочное однонаправленное волокно	ГОСТ 10727—73	120—150	10	—	—	От —40° до +400° С
Маты из штапельного стеклянного волокна на синтетическом связующем	ГОСТ 10499—67	50—75	13—16	2—3	—	От —60° до +200° С
Прокладки из штапельного стеклянного волокна на синтетическом связующем	ТУ 21-РСФСР-459-75	17	12—14	2—3	—	От —60° до +200° С
Вата минеральная	ТУ 21-24-51-73	80—100	8	4	—	От —60° до +200° С
Плиты минераловатные на синтетическом связующем марки ППМ-80, ППМ-100	ТУ 21-24-52-73	80—100	8	4	—	От —60° до +200° С
Плиты минераловатные на фенольном связующем	ГОСТ 9573—72	75—150	10	3—4	—	От —60° до +200° С
Плиты минераловатные на крахмальном связующем (стилит)	ТУ 400-1-81-74	125—200	8	3—4	—	От —60° до +200° С
Плиты минераловатные акустические марки ПА/С	ТУ 21-24-60-77	130	8	2	—	От —60° до +200° С
Плиты минераловатные на крахмальном или синтетическом связующем марки «Акмигран»	ГОСТ 17918—72	350—400	8	—	—	От —60° до +200° С
Капроновое штапельное волокно марки ВТ-4	ТУ 6-06-272-70	50	18—20	—	—	От —60° до +200° С
Войлок из поливинилхлоридных волокон	ТУ 17РСФСР 35-3941-81	150	20	—	—	От —60° до +90° С
2. ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ						
Плиты ячеистобетонные типа «Силакпор»	ОСТ 21-22-76	350—400	800	—	—	—
Винипор полужесткий (ПВХ)	ТУ 6-05-301-09-77	120—130	900	—	0,02	—
Пенополиуретан эластичный (ППУ)	—	35—40	700	—	0,05—0,09	—
Пеногипс	—	300—400	40—100	—	—	—

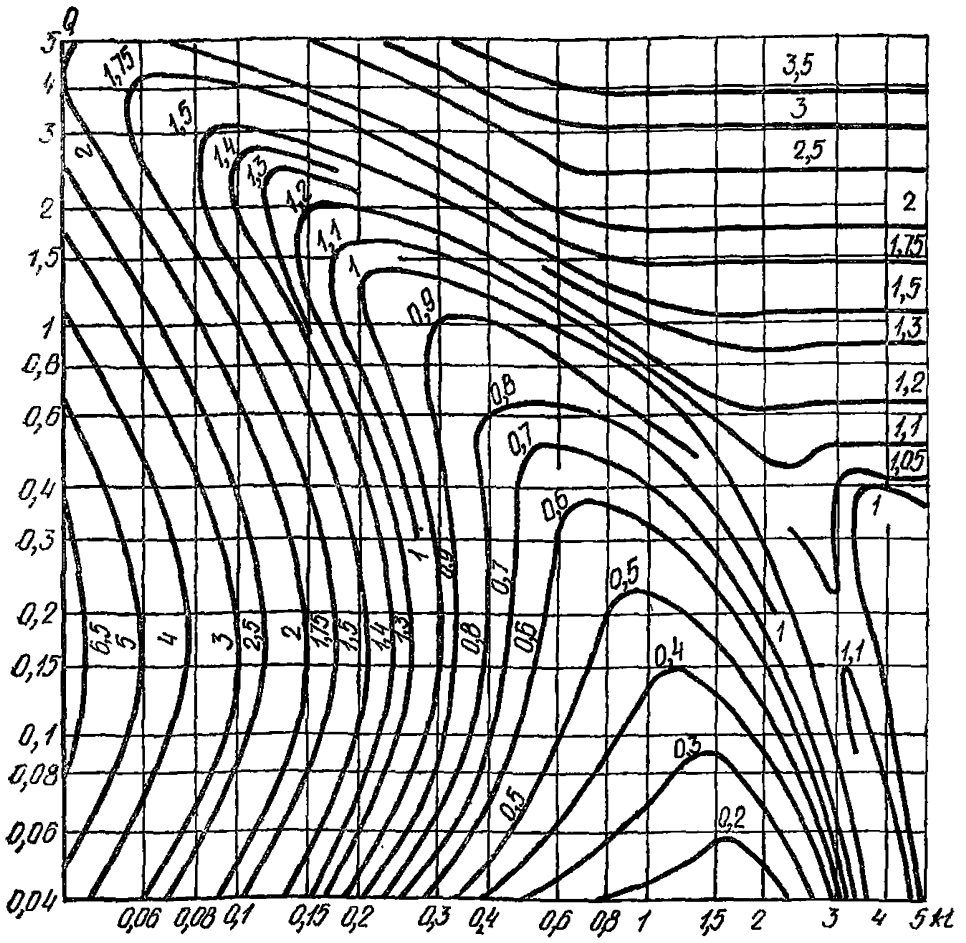


Рис. 1. Номограмма для определения действительной компоненты $R_{сл}$ импеданса слоя волокнистого материала толщиной l, см, расположенного на жестком основании, при наклонном падении звуковой волны под углом 45°

На плоскости номограмм поочередно наносят точку с координатами $Q=0{,}58$ и $kl=0{,}36$ и определяют величины $R_{сл}=0{,}84$; $Y_{сл}=-1{,}75$; $\alpha_{сл}=0{,}52$.

Таблица 2

f, Гц	k, см$^{-1}$	kl	Q	$R_{сл}$	$Y_{сл}$	$\alpha_{сл}$
125	0,02	0,04	1,67	3,0	—14,0	0,05
250	0,04	0,09	1,18	1,8	—6,7	0,14
500	0,09	0,18	0,84	1,2	—3,4	0,29
1000	0,18	0,36	0,58	0,84	—1,75	0,52
2000	0,36	0,73	0,41	0,64	—0,65	0,82
4000	0,73	1,46	0,29	0,72	—0,05	0,95

Результаты расчета импеданса и КЗП на других частотах приведены в табл. 2 и представлены графически на рис. 4.

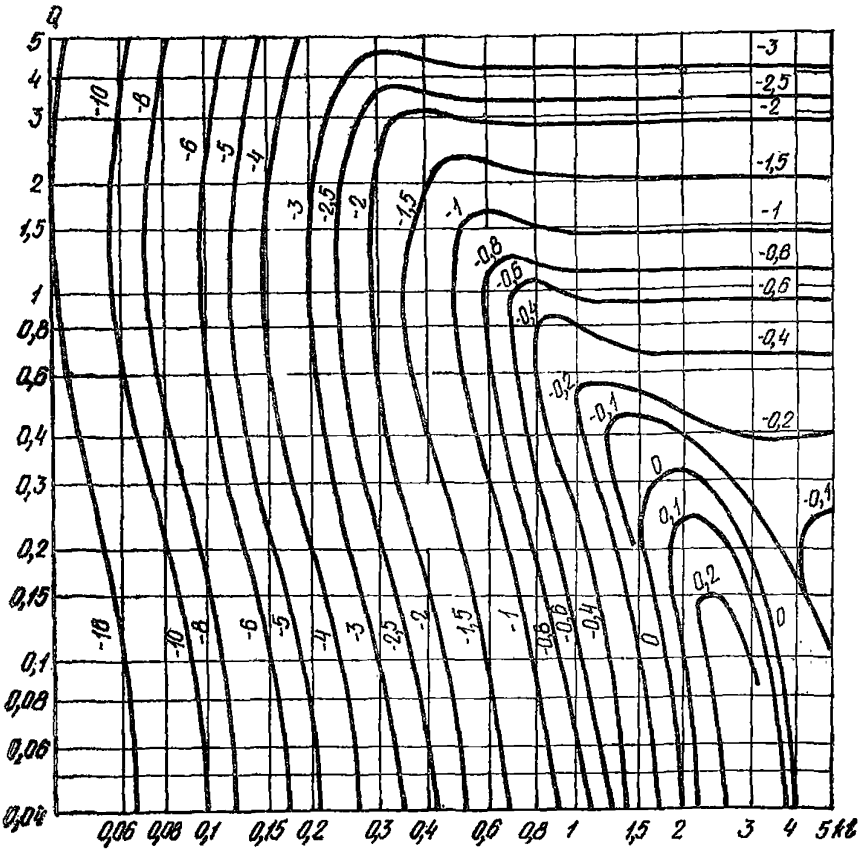


Рис. 2. Номограмма для определения мнимой компоненты $Y_{сл}$ импеданса слоя волокнистого материала толщиной l, см, расположенного на жестком основании, при наклонном падении звуковой волны под углом 45°

2.4. В тех случаях, когда между слоем и жестким основанием имеется воздушный промежуток глубиной L, см, расчет импеданса и КЗП проводят аналогично по номограммам, приведенным в прил. 3 на рис. 1—3, для угла падения 45°.

Каждая номограмма справедлива только для некоторого значения частоты f_i, Гц, вычисляемого из следующего уравнения

$$f_i = \frac{0{,}125ic}{2\pi L},$$

где $i=1, 2, 4, 8, 16$ — целые числа. Индексы номограмм соответствуют значениям kL при заданных числах i. Импеданс и КЗП слоя волокнистого материала, расположенного на относе от жесткого основания, определяют в точках с координатами Q_i и $k_i l$, рассчитанными для данной частоты f_i. Значения f_i могут не совпадать со значениями стандартных частот. Поэтому по результатам расчета строят на графике частотную зависимость коэффициента звукопоглощения и определяют

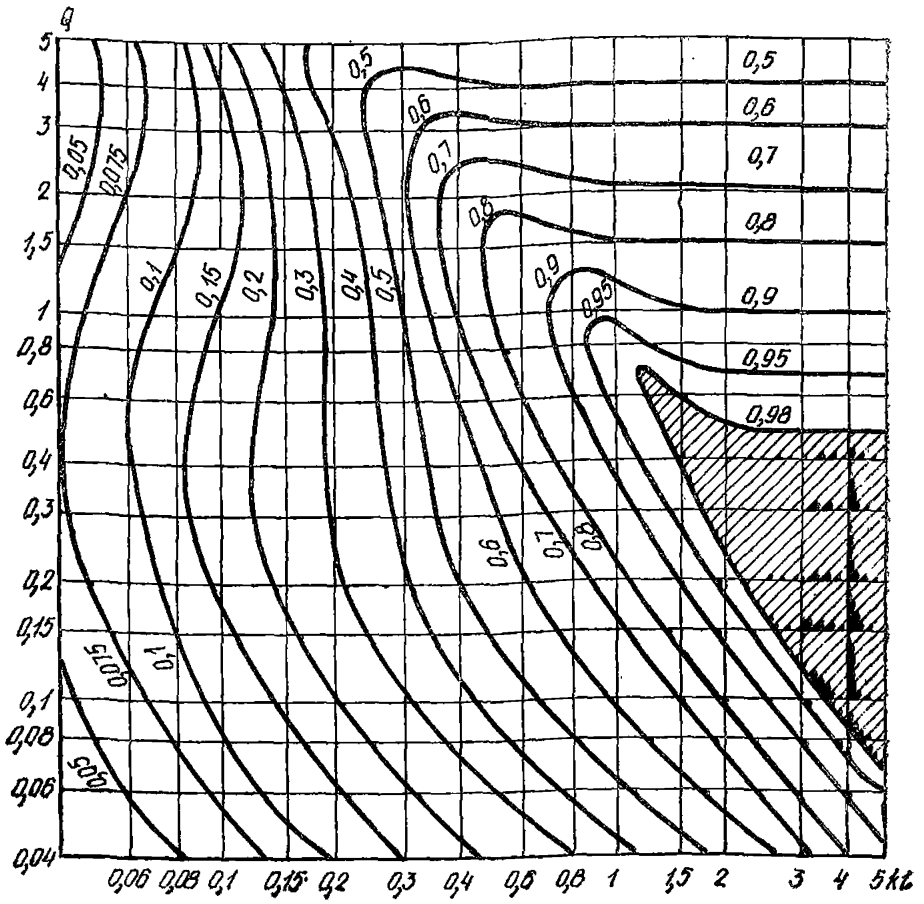


Рис. 3. Номограмма для определения коэффициента звукопоглощения $\alpha_{сл}$ слоя волокнистого материала толщиной l, см, расположенного на жестком основании, при наклонном падении звуковой волны под углом 45°

Таблица 3

kL	k, см$^{-1}$	f_l, Гц	kl	Q	$R_{сл}$	$Y_{сл}$	$\alpha_{сл}$
0,125	0,023	125	0,046	1,67	0,65	—6,2	0,06
0,25	0,046	250	0,092	1,18	0,57	—3,0	0,20
0,5	0,092	500	0,183	0,84	0,47	—1,35	0,47
1	0,183	1000	0,366	0,58	0,48	—0,37	0,84
2	0,366	2000	0,732	0,41	1,0	0,4	0,96
4	0,732	4000	1,464	0,29	0,71	—0,08	0,97

значения КЗП на частотах, соответствующих стандартным (63, 125 и т. д.).

Если расчет по номограммам не охватывает заданный частотный диапазон, вычисления КЗП на недостающих частотах проводят с помощью ЭВМ в соответствии с п. 2.2.

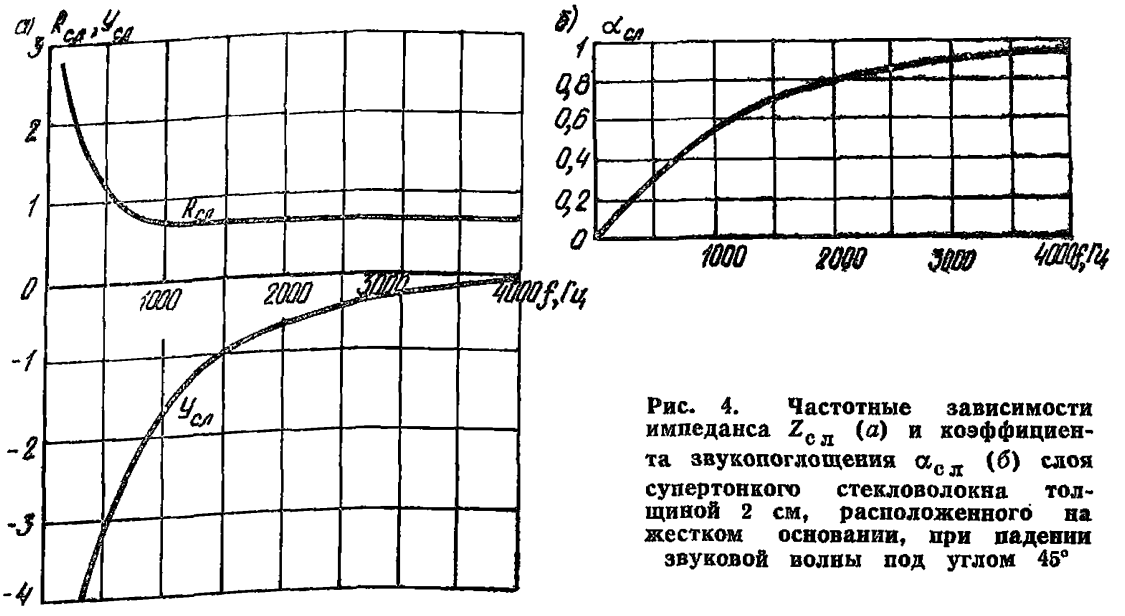


Рис. 4. Частотные зависимости импеданса $Z_{сл}$ (*а*) и коэффициента звукопоглощения $\alpha_{сл}$ (*б*) слоя супертонкого стекловолокна толщиной 2 см, расположенного на жестком основании, при падении звуковой волны под углом 45°

Пример 2. Требуется рассчитать в частотном диапазоне 125—4000 Гц импеданс $Z_{сл}$ и коэффициент звукопоглощения $\alpha_{сл}$ слоя супертонкого стекловолокна (см. пример 1, п. 2.3), расположенного на относе $L=5{,}5$ см от жесткого основания, при наклонном падении звуковой волны под углом 45°. Импеданс и КЗП определяют с помощью номограмм, приведенных на рис. 1—3 прил. 3. Расчет проводят при

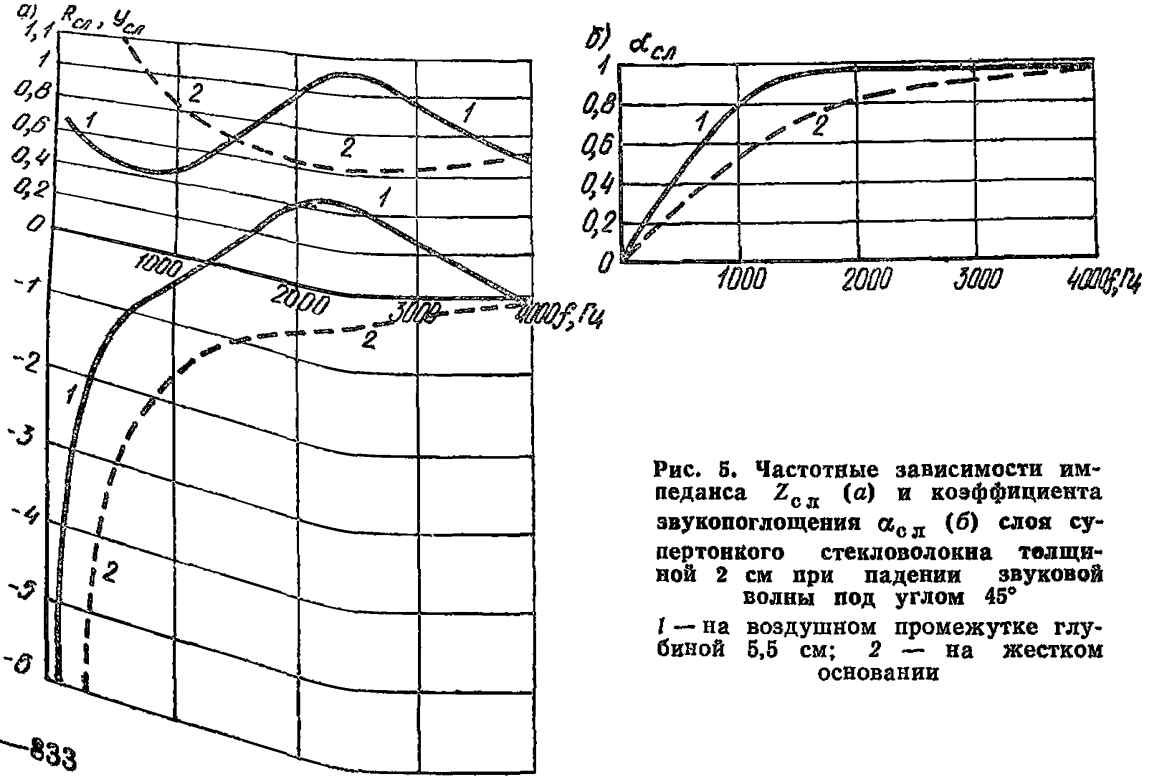


Рис. 5. Частотные зависимости импеданса $Z_{сл}$ (*а*) и коэффициента звукопоглощения $\alpha_{сл}$ (*б*) слоя супертонкого стекловолокна толщиной 2 см при падении звуковой волны под углом 45°

1 — на воздушном промежутке глубиной 5,5 см; *2* — на жестком основании

$kL=1$ и $i=4$. Тогда $f_д=1000$ Гц, $k=0{,}18$ см$^{-1}$, $kd=kl=0{,}36$. Используя значения q и q_0, вычисленные в п. 2.3, получают $Q=0{,}58$.

На плоскости номограмм с индексом $kL=1$ поочередно наносят точку с координатами $Q=0{,}58$, $kl=0{,}36$ и определяют величины $R_{эл}=0{,}48$, $Y_{эл}=-0{,}37$ и $\alpha_{эл}=0{,}84$.

Результаты расчета импеданса и КЗП на других частотах f_i приведены в табл. 3 и представлены графически на рис. 5.

На частоте 4000 Гц импеданс и КЗП конструкции определены с помощью ЭВМ в соответствии с п. 2.2.

Расчет импеданса защитного покрытия (ткани, пленки и перфорированного экрана)

2.5. Акустические свойства различных видов тканей, применяемых в звукопоглощающих конструкциях в качестве защитной оболочки слоя волокнистого материала, характеризуют безразмерным импедансом $Z_{тк}=R_{тк}+jY_{тк}$, где $R_{тк}$, $Y_{тк}$ — действительная и мнимая компоненты соответственно.

Величина $Z_{тк}$ является функцией частоты звука и физико-технических параметров ткани, приведенных в ГОСТ или ТУ. К последним относятся: толщина ткани l_0, мм; поверхностная плотность m, г/см^2; число нитей на 1 см N, равное среднему арифметическому из количества нитей по основе и по утку; ширина нити $d_н$, мм.

Импеданс ткани также зависит от того, насколько плотно прилегает ткань к поверхности слоя поглотителя. Для оценки влияния степени контакта введен некоторый множитель ε, равный 1 при условии свободного расположения ткани в конструкции. Если ткань прижата вплотную к поверхности поглотителя посредством перфорированного экрана или сетки, то коэффициент ε определяют по значению коэффициента перфорации покрытия η, %, согласно равенству

$$\varepsilon=0{,}9+10\eta^{-1}. \tag{13}$$

Для расчета импеданса ткани используют следующее выражение

$$Z_{тк}=(R^0_{тк}+jY^0_{тк})\,\varepsilon\cos\theta, \tag{14}$$

где $R^0_{тк}$, $Y^0_{тк}$ — действительная (резистанс) и мнимая (реактанс) компоненты импеданса ткани при нормальном падении звука ($\theta=0°$).

Величина $R^0_{тк}$ не зависит от частоты звука и равна сопротивлению статическому потоку ткани σ, которое в общем случае определяют экспериментально, а для тканей полотняного плетения рассчитывают по эмпирической формуле

$$R^0_{тк}=\sigma=\left(\frac{mN10^{-4}}{\rho_0\sqrt{d_н l_0}}\right)^2. \tag{15}$$

Реактанс ткани $Y^0_{тк}$ находят из графика рис. 6 по аргументу $\xi_{тк}$, вычисляемому из равенства

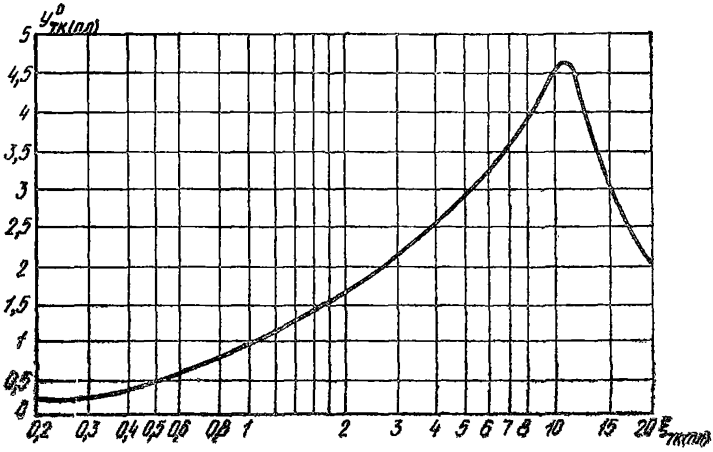


Рис. 6. Номограмма для определения реактанса ткани и пленки

$$\xi_{тк} = (1 + \sigma^2)\,\frac{mk\sigma}{4\rho_0}. \qquad (16)$$

В расчетах по равенствам (15) и (16) плотность воздуха следует принимать при температуре 20°С $\rho_0 = 1{,}23 \cdot 10^{-3}$ г/см³.

В табл. 4 приведены физико-технические параметры некоторых стеклянных тканей отечественного производства и их акустические характеристики, рассчитанные согласно выражениям (15) и (16).

2.6. Акустические свойства пленок, применяемых наряду с тканями в звукопоглощающих конструкциях в качестве защитных оболочек, также характеризуют импедансом $Z_{пл} = R_{пл} + jY_{пл}$, где $R_{пл}$ и $Y_{пл}$ — действительная и мнимая компоненты импеданса соответственно.

Импеданс $Z_{пл}$ зависит от частоты звука, толщины пленки l_0, мм, поверхностной плотности m, г/см², от степени контакта пленки со слоем волокнистого материала. Последнее обстоятельство приводит к необходимости учитывать при расчете импеданса пленки множитель ε, вычисляемый по равенству (13).

Импеданс пленки определяют согласно выражению

$$Z_{пл} = (R^0_{пл} + jY^0_{пл})\,\varepsilon \cos\theta, \qquad (17)$$

где $R^0_{пл}$ и $Y^0_{пл}$ — резистанс и реактанс пленки при нормальном падении звука соответственно.

Резистанс пленки вычисляют по формуле

$$R^0_{пл} = \left(\frac{m10^{-3}}{\rho_0 l_0}\right)^2, \qquad (18)$$

а реактанс определяют из графика рис. 6 по безразмерному аргументу $\xi_{пл} = mk/\rho_0$.

Таблица 4

Материал и марка	ГОСТ или ТУ	$m \cdot 10^{-4}$, г/см²	l_0, мм	N	$d_н$, мм	$R^0_{тк}$ (пл)	$\xi \cdot k^{-1}$, см
Стеклянная ткань А-1	ГОСТ 8481—75	69	0,1	18	0,4	0,25	0,37
То же ЭЗ-100	ГОСТ 19907—74	108	0,1	18	0,4	0,62	1,9
» ТСТ-4	ТУ 6-11-118-75	120	0,1	20	0,6	0,64	2,2
» ТСТ-6	ТУ 6-11-118-75	70	0,07	18	0,4	0,37	0,6
» ТСТ-9	ТУ 6-11-118-75	116	0,10	16	0,45	0,5	1,47
» ТСТ-12А	ТУ 6-11-118-75	287	0,17	17	0,72	1,37	22,7
» Т-11	ГОСТ 19170—73	300	0,24	13	0,55	0,75	7,1
» Т-13	ГОСТ 19170—73	285	0,2	16	0,55	1,2	16,9
» ВПР-10	ТУ 6-11-196-71	165	0,14	10	0,60	0,2	0,7
» И-200	ТУ 6-11-135-75	230	0,14	18	0,42	1,84	37,5
Пленка полиэтилентерефталатная ПЭТФ	МРТУ 6-05-1065-76	35	0,025	—	—	1,27	2,84
	МРТУ 6-05-1065-76	70	0,05	—	—	1,30	5,72
Пленка полиэтиленовая ПЭ	ГОСТ 10354—82	23	0,025	—	—	0,55	1,87
	ГОСТ 10354—82	28	0,03	—	—	0,76	2,27
	ГОСТ 10354—82	46	0,05	—	—	0,55	3,75

Физико-технические и акустические характеристики полиэтилентерефталатной (ПЭТФ) и полиэтиленовой (ПЭ) пленок представлены в табл. 4.

2.7. Перфорированное покрытие или экран представляет собой достаточно жесткий лист какого-либо материала (кровельная сталь, алюминий, винипласт, гипс и т. д.), по всей площади которого пробиты отверстия в определенном порядке. Отверстия располагаются, как правило, равномерно в углах квадратной единичной ячейки либо в шахматном порядке. Отверстия могут иметь любую форму: круглую, квадратную, ромбовидную и т. д.

Акустические свойства перфорированных покрытий (экранов) характеризуют импедансом $Z_{эк} = R_{эк} + jY_{эк}$, где $R_{эк}$, $Y_{эк}$ — действительная и мнимая компоненты импеданса соответственно.

Импеданс перфорированного экрана является функцией частоты звука, коэффициента перфорации, линейных размеров отверстий и толщины экрана l_0, см. Коэффициент перфорации η, %, представляет собой отношение площади отверстия S_0, мм², к площади единичной ячейки S, мм², согласно равенству $\eta = 100S_0/S$, %.

Кроме того, импеданс покрытия изменяется в зависимости от того, насколько плотно прилегает экран к поверхности слоя звукопоглощающего материала. В том случае, когда между экраном и поверхностью поглотителя имеется зазор в 2—3 мм (неплотный контакт — НПК), действительную компоненту импеданса принимают равной нулю, а мнимую компоненту определяют из следующего выражения

$$Y_{эк} = \frac{k100}{\eta}(l_0 + 2\delta)\cos\theta, \qquad (19)$$

где δ — концевая поправка к толщине перфорированного покрытия, см.

Для круглого отверстия диаметром D, см, концевую поправку определяют из графика рис. 7. При $\eta \leqslant 10\%$ величина δ может быть рассчитана по приближенной формуле

$$\delta = 0{,}425D\left(1 - \sqrt{0{,}02\eta}\right).$$

При плотном контакте (ПК) перфорированного экрана и слоя волокнистого поглотителя импеданс $Z_{эк}$ зависит не только от величин η, D, l_0 и δ, но и от структурной характеристики волокнистого материала, определяемой по равенству (9).

В этом случае компоненты импеданса рассчитывают по следующим выражениям

$$R_{эк} = \delta\sigma_s\eta^{-1}\,100\cos\theta; \qquad (20)$$

$$Y_{эк} = \frac{k\,100}{\eta}[l_0 + \delta(1 + k_s)]\cos\theta, \qquad (21)$$

где

$$\sigma_s = kQ(3 + 2Q);$$

$$k_s = \frac{(1+Q)^3 - Q^3(2+Q)}{1+Q}.$$

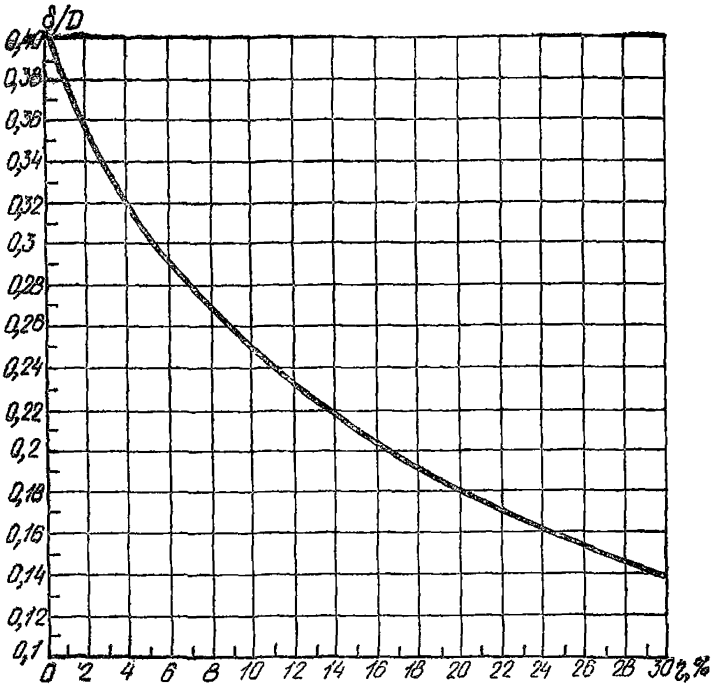


Рис. 7. Зависимость величины δ/D для круглого отверстия от коэффициента перфорации экрана

В табл. 5 приведены физические и акустические характеристики некоторых перфорированных экранов отечественного производства.

Таблица 5

Вид экрана	ГОСТ, ТУ	η_0, %	D, мм	l_0, мм	δ, см	$\gamma_{эк} \cdot \frac{1}{k}$, см
1 Алюминиевый лист	ТУ 36-1947-76	14	5,0	1	0,11	1,61
2 То же	ТУ 36-1947-76	17	3,0	1	0,08	0,91
3 »	ТУ 36-1947-76	27	2,5	0,7	0,037	0,37
4 Асбоцементный лист	РТУ 084-65	9,6	7	5,5	0,18	7,6
5 То же	РТУ 084-65	19,5	7	5,5	0,12	3,46
6 Гипсовая плита	ТУ 283-67	12	10	10	0,23	10,3

Пример 3. Требуется рассчитать в частотном диапазоне 125—4000 Гц импеданс $Z_к$ и КЗП $\alpha_к$ при наклонном падении звуковой волны под углом 45° на конструкцию, состоящую из слоя супертонкого стекловолокна (п. 2.3), обернутого в стеклоткань Э3-100 и покрытого перфорированным экраном, при неплотном и плотном контакте. Физико-технические параметры ткани Э3-100 приведены в табл. 4. Толщина

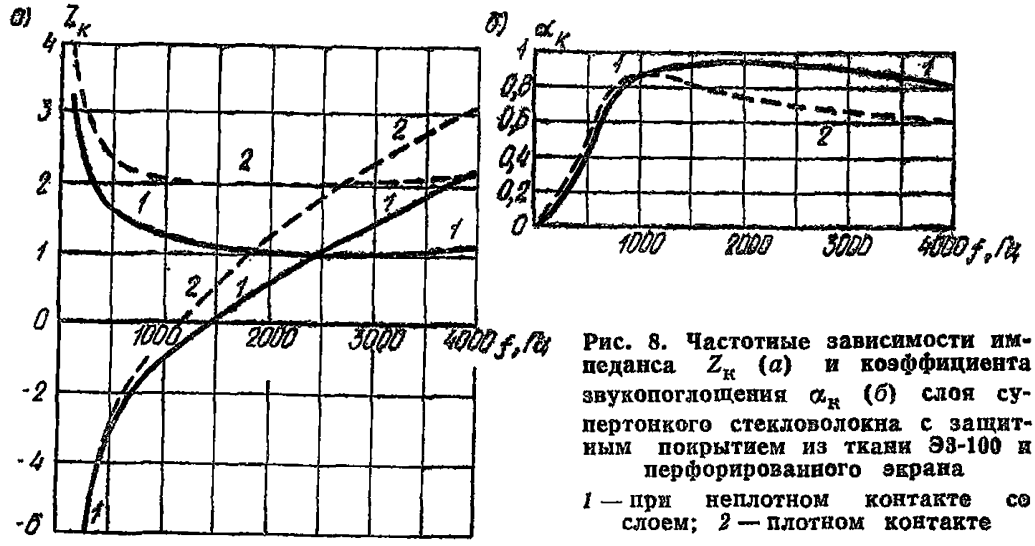


Рис. 8. Частотные зависимости импеданса $Z_к$ (*а*) и коэффициента звукопоглощения $\alpha_к$ (*б*) слоя супертонкого стекловолокна с защитным покрытием из ткани Э3-100 и перфорированного экрана

1 — при неплотном контакте со слоем; *2* — плотном контакте

перфорированного экрана l_0=0,1 см; диаметр отверстий D=0,25 см; коэффициент η=7,1 %.

Расчет проводят для частоты 1000 Гц. Значения импеданса слоя волокнистого материала принимают из табл. 2.

При неплотном контакте вычисляют: согласно равенствам (13)—(16) при ε=1 $R_{тк}$=0,44 и $Y_{тк}$=0,23; согласно равенству (19) $Y_{эк}$==0,42; согласно равенствам (11) и (1) $Z_к$=1,28—*j*1,1 и $\alpha_к$=0,8.

При плотном контакте вычисляют: согласно равенствам (13)—(16) ε=2,35, $R_{тк}$=1 и $Y_{тк}$=0,56; согласно равенствам (20) и (21) $R_{эк}$=0,29

Таблица 6

f, Гц	$Y_{тк}$	$Y_{эк}$	$R_к$	$Y_к$	$\alpha_к$
125	0,03	0,05	3,44	—13,90	0,07
250	0,07	0,10	2,24	—6,50	0,17
500	0,13	0,21	1,64	—3,06	0,44
1000	0,23	0,42	1,28	—1,10	0,80
2000	0,42	0,85	1,08	0,62	0,92
4000	0,56	1,70	1,16	2,21	0,84

Таблица 7

f, Гц	$Y_{тк}$	$R_{эк}$	$Y_{эк}$	$R_к$	$Y_к$	$\alpha_к$
125	0,08	0,16	0,08	4,16	—13,8	0,08
250	0,16	0,19	0,15	3,0	—6,4	0,21
500	0,31	0,22	0,29	2,42	—2,8	0,52
1000	0,56	0,29	0,53	2,13	—0,66	0,83
2000	0,96	0,36	1	2,0	1,31	0,75
4000	1,3	0,47	1,94	2,20	3,2	0,62

и $Y_{вк}=0{,}53$; согласно равенствам (11) и (1) $Z_к=2{,}13-j0{,}66$ и $\alpha_к=0{,}83$.

Результаты расчета для стандартных частот в диапазоне 125—4000 Гц приведены в табл. 6 и 7 при неплотном и плотном контактах соответственно.

На рис. 8 представлены частотные зависимости импеданса и коэффициента звукопоглощения рассмотренной выше конструкции.

Из сравнения частотных характеристик КЗП следует, что плотный контакт поверхности слоя с защитными покрытиями приводит к заметному снижению коэффициента звукопоглощения в области частот выше 2000 Гц. В связи с этим в конструкциях рекомендуется располагать перфорированные экраны с небольшим воздушным зазором (1—2 мм) от поверхности слоя поглотителя, покрытого тканью.

Расчет диффузного коэффициента звукопоглощения плоской акустической облицовки

2.8. В общем случае диффузный коэффициент звукопоглощения $\alpha_д$ плоской акустической облицовки может быть рассчитан согласно формуле Пэриса

$$\alpha_д = 0{,}174\left(\frac{x_0+x_{90}}{2}+x_{10}+\ldots+x_\theta+\ldots+x_{80}\right), \qquad (22)$$

где величину $x_\theta=\alpha_к \sin 2\theta$ вычисляют при $\theta=0°$, 10°, 20°, ..., 90° в соответствии с требованиями пп. 2.1—2.7 (индекс величины x^θ соответствует значению угла падения θ, изменяющегося от 0 до 90° с интервалом 10°).

В некоторых частных случаях для расчета диффузного коэффициента звукопоглощения может быть использовано приближенное равенство $\alpha_д=\alpha_к$, где $\alpha_к$ — коэффициент звукопоглощения акустической конструкции, вычисленной в соответствии с пп. 2.1—2.7 для заданного значения угла падения $\theta_д$.

Если слой волокнистого звукопоглощающего материала расположен вплотную к жесткому основанию или на некотором относе сравнительно небольшой глубины от него, когда $0\leqslant kL\leqslant 0{,}5$, то условие $\alpha_д=\alpha_к$ выполняется при $\theta_д=45°$. Это значение угла падения звуковой волны остается справедливым для расчета величины $\alpha_д$ достаточно толстых слоев материала ($kl>1{,}5$) на частотах выше 4000 Гц для любой глубины воздушного промежутка между слоем и жестким основанием.

При $kl\leqslant 0{,}2$ и $0{,}5\leqslant kL\leqslant 2{,}5$ значение угла падения $\theta_д$ может быть рассчитано согласно следующему эмпирическому выражению

$$\theta_д = 45° + \frac{Q}{3}\,(kL-0{,}5),$$

где величину Q вычисляют в соответствии с равенством (9).

2.9. В прил. 4 приведены частотные характеристики диффузного коэффициента звукопоглощения различных облицовок, рассчитанные в соответствии с пп. 2.1—2.8 для трех волокнистых материалов (базаль-

товое волокно, супертонкое стеклянное волокно и минеральная вата, см. табл. 1).

В расчете использованы два варианта защитных тканей (ТСТ-6 и Э3-100, см. табл. 4) и три варианта алюминиевых перфорированных покрытий (поз. 1, 2, 3, см. табл. 5) при условии неплотного контакта.

Некоторые звукопоглощающие конструкции были описаны ранее в главе СНиП II-12-77 «Защита от шума». Там же приведены значения реверберационных коэффициентов звукопоглощения, полученных экспериментально в камере в условиях нарушения диффузности звукового поля в замкнутом объеме при внесении в него звукопоглощающей облицовки. По этой причине значения реверберационных КЗП отличаются от значений диффузного коэффициента звукопоглощения, как правило, превышая последние в 1,5—2 раза в частотном диапазоне 250—500 Гц.

3. ТРЕБОВАНИЯ К АКУСТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЗАДАННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ

3.1. Эффективное снижение уровня шума в производственных помещениях возможно при использовании звукопоглощающих конструкций и облицовок, удовлетворяющих определенным требованиям как с точки зрения достаточно высокого поглощения звука, так и санитарных, противопожарных, гигиенических норм.

Поскольку спектр шума в общем случае является широкополосным, то коэффициент звукопоглощения облицовки должен быть близким к единице также в широкой области частот. Условно можно считать конструкцию эффективной и широкополосной, если на частотах выше 2000 Гц коэффициент звукопоглощения превышает значение 0,8. На рис. 9 приведены частотные зависимости коэффициента звукопоглощения таких конструкций. Индексы кривых соответствуют значению КЗП при частоте 500 Гц.

Любая из представленных частотных характеристик КЗП с заданным индексом обеспечивается специальным подбором параметров звукопоглощающей облицовки. По известным физико-техническим величинам (плотности и диаметру волокна) волокнистого материала для каждого индекса частотной зависимости коэффициента звукопоглощения определяется некоторая оптимальная толщина $l_{опт}$ слоя в конструкции. На рис. 10 показана номограмма для определения $l_{опт}$ слоя волокнистого материала, расположенного на жестком основании, по величине структурной характеристики Q_{500} поглотителя, вычисленной из формулы (9) при частоте 500 Гц.

Номограммой можно пользоваться только в области, отмеченной пунктирной линией. Вне этой области ни одна частотная зависимость

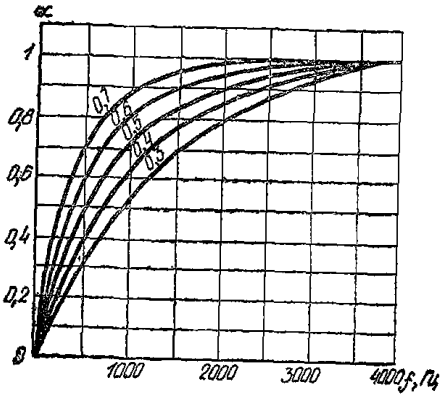


Рис. 9. Частотные зависимости диффузного коэффициента звукопоглощения эффективных акустических облицовок

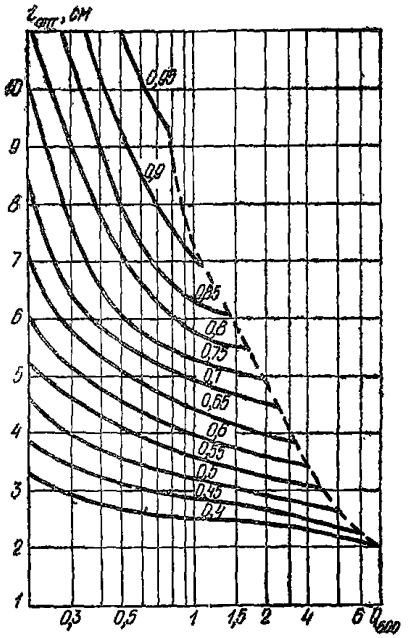


Рис. 10. Номограмма для определения оптимальной толщины слоя волокнистого материала, обеспечивающей заданную частотную характеристику диффузного коэффициента звукопоглощения

с тем или иным индексом не может быть достигнута ни при какой толщине слоя.

Чем выше индекс кривой, тем больше должна быть выбрана толщина слоя волокнистого материала с заданными плотностью и диаметром волокна.

Из анализа номограммы следует, что увеличение плотности поглотителя не дает существенного уменьшения толщины слоя при одном и том же индексе кривой. При уплотнении материала вдвое толщина слоя уменьшается всего лишь в 1,1—1,2 раза. Поэтому в конструкциях целесообразно применять волокнистый материал с плотностью, получаемой в процессе его изготовления. Искусственное уплотнение поглотителя приводит лишь к расходу материала и к удорожанию конструкции, а выигрыш в толщине слоя или в звукопоглощении получается незначительным. Таким образом, при проектировании экономически выгодных облицовок плотность материала не должна превышать своего значения в естественном состоянии поглотителя.

Частотные зависимости коэффициента звукопоглощения эффективных акустических конструкций, представленные на рис. 9, позволяют лишь ориентировочно оценить величину КЗП на среднегеометрических частотах октавных полос в диапазоне 125—8000 Гц за исключением частоты слоя. Поэтому после того, как выбрана величина $l_{опт}$ слоя поглотителя в конструкции, необходимо уточнить значения КЗП посредством номограмм рис. 1—3 в соответствии пп. 2.1—2.4.

Пример расчета. Требуется определить оптимальную толщину минераловатной плиты (ГОСТ 9573—72) с плотностью 80 кг/м^3, диамет-

ром волокна 8 мкм, длиной волокна 4 см, при которой обеспечивается частотная характеристика коэффициента звукопоглощения с индексом 0,8.

Согласно равенству (9) рассчитывается структурная характеристика при частоте 500 Гц. Она равна 0,93. Из номограммы рис. 10 определяется значение оптимальной толщины слоя, равное 5,8 см для кривой с индексом 0,8 при $Q_{500}=0{,}93$.

С уменьшением задаваемого индекса толщина слоя будет также уменьшаться. Так при индексе 0,6 $l_{опт}$ будет равна 4 см для того же значения $Q_{500}=0{,}93$. При уплотнении материала вдвое структурная характеристика увеличится примерно в 1,5 раза, $Q_{500}=1{,}52$, а толщина слоя при индексе 0,6 уменьшится от 4 до 3,8 см, т. е. всего лишь в 1,05 раза. Таким образом, уплотнение материала не обеспечивает выигрыша в толщине слоя для достижения одного и того же значения коэффициента звукопоглощения (индекса).

3.2. Параметры тканей, пленок и перфорированных экранов, без которых нельзя применять слои волокнистого звукопоглощающего материала в конструкциях, должны удовлетворять следующему требованию: снижение коэффициента звукопоглощения конструкции, неизбежное на частотах выше 2000 Гц при использовании защитных покрытий, должно быть небольшим.

Оптимальные параметры покрытий рассчитывают при частоте 4000 Гц, для которой задается величина относительного снижения коэффициента звукопоглощения конструкции $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}100=\frac{\alpha-\alpha_к}{\alpha}100$, где α, $\alpha_к$ — коэффициенты звукопоглощения слоя волокнистого материала без покрытия и с покрытием соответственно.

Для обеспечения достаточно высокого коэффициента звукопоглощения в широкой области частот оптимальные параметры защитных тканей (пленок) и перфорированных экранов следует выбирать из условия $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}100\leqslant 10-15\%$. Поскольку в конструкциях нередко используются одновременно два вида покрытия (ткань и перфорированный экран), то при расчетах оптимальных параметров необходимо учитывать, что их общее снижение КЗП $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}100$ не должно превышать 20—25%.

3.3. Оптимальная величина сопротивления постоянному потоку $\sigma_{опт}$ ткани определяется согласно номограмме, показанной на рис. 11, *а*, при заданных значениях относительного снижения КЗП и фактора ε, учитывающего степень контакта покрытия с поверхностью поглотителя. На том же рисунке параллельно оси абсцисс приведена шкала значений коэффициента звукопоглощения слоя поглотителя, обернутого тканью, при условии, что КЗП того же слоя без ткани равен единице, а величины $R_{сж}=1$ и $Y_{сж}=0$.

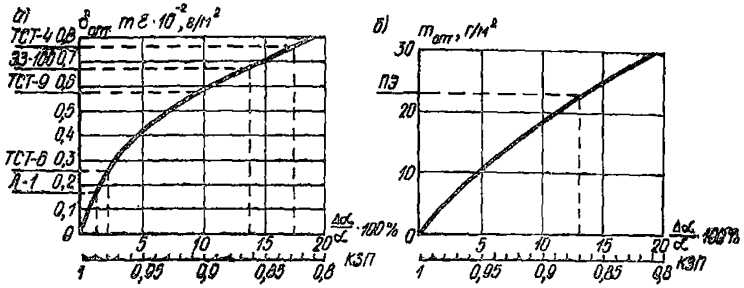


Рис. 11. Номограмма для определения оптимальных физических параметров при падении звуковой волны под углом 45°

а — для ткани; *б* — для пленки

Если выбранное относительное снижение КЗП составляет не более 10%, то величина $\sigma_{опт}$ вычисляется из следующего приближенного выражения

$$\sigma_{опт} \leqslant 58/m\varepsilon 10^4. \qquad (23)$$

Откуда следует, что для обеспечения достаточно высокого поглощения звука в широкой области частот сопротивление постоянному потоку ткани не должно превышать значения $58/m10^4$ при $\varepsilon=1$. В качестве примера защитных покрытий, удовлетворяющих этому требованию, можно привести ткани А-1, ТСТ-6, ТСТ-9.

Как видно из графика рис. 11, *а*, использование в конструкциях тканей марки Э3-100 и ТСТ-4 (табл. 4) приводит к более значительному снижению КЗП на частоте 4000 Гц (14 и 18% соответственно). В этом случае для обеспечения достаточно широкополосного звукопоглощения облицовки потребуется более строгий выбор параметров перфорированного покрытия (см. п. 3.5) так, чтобы при совместном действии ткани и экрана общее $\frac{\Delta\alpha}{\alpha} 100$ не превышало бы 20—25%.

Кроме того, при выполнении условия (23) «акустически прозрачная» ткань не должна быть слишком редкой. В противном случае она не будет препятствовать высыпанию волокон из слоя звукопоглощающего материала и тем самым не будет выполнять функции защитного покрытия. В связи с этим число нитей ткани на 1 см должно быть не менее 12.

3.4. Для выбора оптимальных параметров пленок используется график, представленный на рис. 11, *б*. Если заданное относительное снижение КЗП составляет менее 10%, то оптимальное значение поверхностной плотности пленки определяется из следующего приближенного неравенства:

$$m_{опт} \leqslant 18/\varepsilon 10^4. \qquad (24)$$

Таким образом, достаточно широкополосное поглощение звука слоем волокнистого материала с пленочным покрытием может быть достиг-

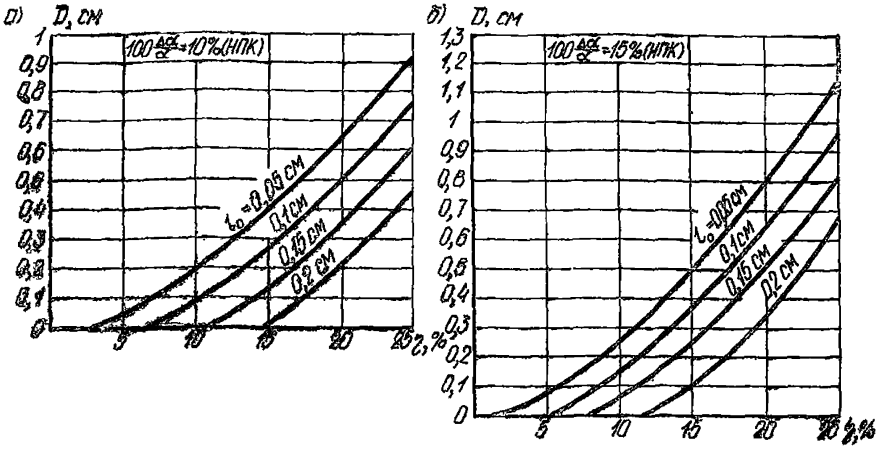


Рис. 12. Номограмма для определения диаметра отверстия перфорированного экрана, обеспечивающего при неплотном контакте заданное снижение коэффициента звукопоглощения $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}100\%$ ($а$ — 10%; $б$ — 15%)

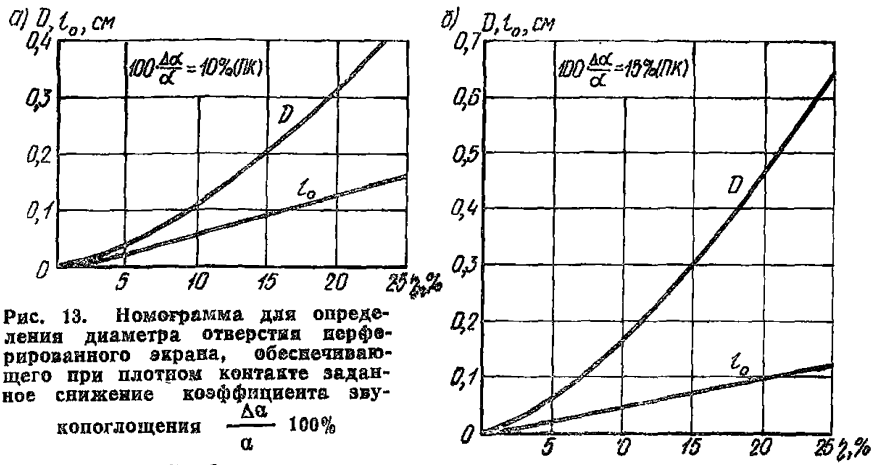


Рис. 13. Номограмма для определения диаметра отверстия перфорированного экрана, обеспечивающего при плотном контакте заданное снижение коэффициента звукопоглощения $\frac{\Delta\alpha}{\alpha}100\%$

$а$ — 10%; $б$ — 15%

нуто только для очень легких ($m_{опт} \leqslant 18\cdot10^{-4}$, г/см²) и тонких ($l_0 \leqslant$ $\leqslant$20 мкм) пленок при условии свободного расположения (НПК) их в конструкции. В некоторой степени этим требованиям удовлетворяют, например, параметры пленки ПЭ (ГОСТ 10354—73) $m=23\cdot10^{-4}$ г/см² и $l_0 = 25$ мкм $\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}100 = 13\%\right)$.

3.5. Оптимальные значения диаметра отверстия $D_{опт}$, см, при заданных величинах коэффициента перфорации η и толщины экрана l_0, см, выбираются с помощью номограмм, данных на рис. 12—13 при условии неплотного и плотного прилегания покрытия к слою волокнистого поглотителя соответственно.

При неплотном контакте (НПК) толщина экрана может быть задана произвольно в достаточно широких пределах, но при плотном контакте выбор этой величины строго ограничен и зависит (так же, как и диаметр отверстия) от коэффициента перфорации (рис. 13).

Чем выше коэффициент перфорации экрана, тем больше может быть диаметр отверстия, обеспечивающий заданное относительное снижение КЗП поглотителя, обусловленное применением перфорированного покрытия и конструкции. Кроме того, чем толще экран, тем более ограничена область выбора значений диаметра.

Например, для того чтобы снижение КЗП не превышало 10% на частоте 4000 Гц при использовании перфорированного покрытия толщиной 0,1 см и с коэффициентом перфорации 15%, диаметр отверстия должен быть равным или меньше 0,26 см при НПК (рис. 12).

Как видно из номограммы, с увеличением толщины экрана вдвое до 0,2 см заданное снижение КЗП не достигается ни при каких значениях диаметра. В случае плотного контакта (рис. 13) то же самое снижение КЗП получается при уменьшении диаметра отверстия от 0,26 см (НПК) до 0,21 см для толщины экрана 0,09 см.

Из номограммы рис. 12, *а* и 12, *б* следует, что требованиям $\Delta\alpha/\alpha 100 \leqslant 10 \div 15\%$ удовлетворяют только два перфорированных экрана (поз. 2 и 3 табл. 5), в то время как остальные перфорированные покрытия, имеющие толщину более 0,1 см, приводят к значительному снижению коэффициента звукопоглощения слоя волокнистого материала на высоких частотах.

4. УСЛОВИЯ РАВНОЦЕННОЙ ЗАМЕНЫ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ И ЗАЩИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

4.1. При проектировании звукопоглощающих облицовок, а также при практическом использовании их в строительстве нередко появляется необходимость акустически равноценной замены одного поглотителя другим.

В общем случае эта задача имеет непростое решение, поскольку с точки зрения звукопоглощения эквивалентность поглотителей означает не только совпадение значений коэффициентов звукопоглощения, но и равенство импедансов конструкций на любой фиксированной частоте. Последнее условие требует выполнения определенного соотношения между физико-техническими параметрами таких материалов, которое при заданной толщине облицовок сводится к равенству структурных характеристик $Q_п$ и его заменителем $Q_з$ на всех стандартных частотах. Для этой цели рассчитывают частотные зависимости структурной характеристики материала-заменителя с различной плотностью и сравнивают их с частотной зависимостью величины $Q_п$ материала-поглотителя. Определяют значение плотности заменителя при условии совпадения величин $Q_п$ и $Q_з$ с точностью не менее 95% во всем частотном диапазоне.

Уравнение $Q_п = Q_з$ имеет простое решение только для жестких пористых или волокнистых звукопоглощающих материалов. Тогда значение плотности материала-заменителя выбирают из следующего приближенного выражения:

$$\rho_з = \rho_п \sqrt{d_з/d_п}, \qquad (25)$$

где $\rho_п$, $\rho_з$ и $d_п$, $d_з$ — плотности и средние диаметры пор (волокон) поглотителя и его заменителя соответственно.

В табл. 8 приведены значения плотностей акустически равноценных некоторых волокнистых звукопоглощающих материалов отечественного производства, физико-технические параметры которых см. в табл. 1.

Таблица 8

Материал, ГОСТ или ТУ	Диаметр волокна, мкм	Плотность, кг/м³
Ультратонкое штапельное базальтовое волокно (ТУ 550-2-44-72)	1	10, 15, 20, 25
Супертонкое стеклянное волокно (ТУ 21-01-224-75)	2	15, 20, 32, 45
Вата минеральная (ТУ 21-24-51-73)	8	85, 100, 160, 185
Маты из штапельного стеклянного волокна (ГОСТ 10499—78)	13	108, 128, 205, 240
Капроновое штапельное волокно марки ВТ-4 (ТУ 6-06-272-70)	20	135, 160, 255, 300

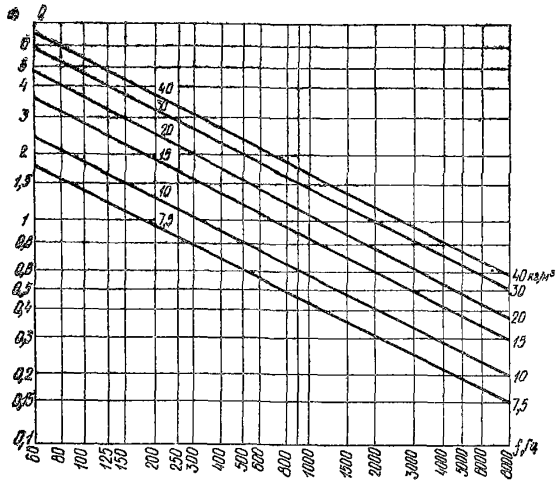
Из табл. 8 следует, что ультратонкое базальтовое волокно плотностью 10 кг/м³ можно заменить на супертонкое стеклянное волокно плотностью 15 кг/см³ или на минеральную вату плотностью 85 кг/м³ и т. д. Стоимость же 1 м² облицовок толщиной 10 см, выполненных из этих материалов, составляет примерно 6,3 и 1,6 руб. соответственно. Таким образом, учет взаимозаменяемости волокнистых звукопоглощающих материалов может привести в отдельных случаях к некоторому снижению стоимости конструкции (при неизменном звукопоглощении).

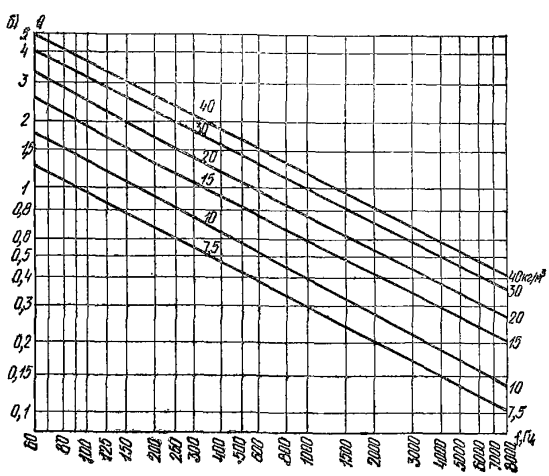
Однако в стремлении снизить стоимость облицовки не следует забывать о гигиенических требованиях к звукопоглощающим материалам: использование дешевых материалов с грубыми волокнами может привести к тому, что выделение стеклянной пыли превысит допустимые нормы.

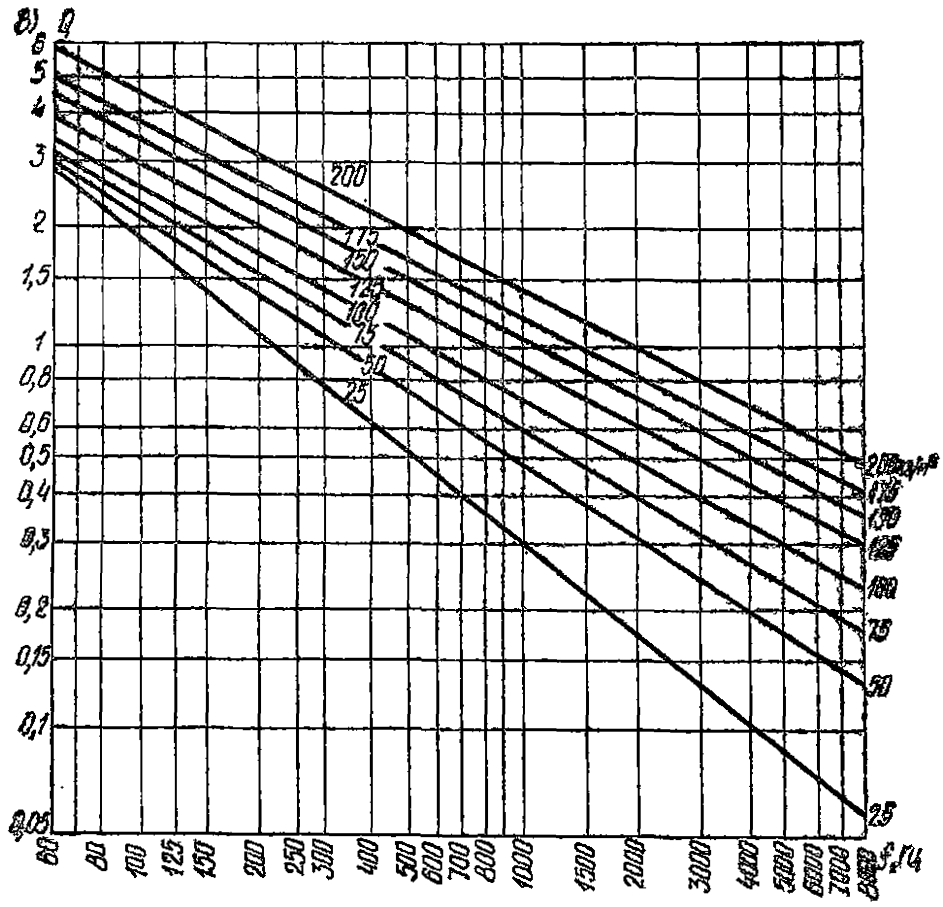
4.2. Замену защитных покрытий (тканей, пленок, перфорированных экранов) следует проводить также с учетом равенства их частотных зависимостей импедансов и КЗП. Для тканей это условие выполняется при соблюдении двух требований: равенства значений сопротивлений продуванию ($\sigma_з = \sigma_п$) и поверхностных плотностей ($m_з = m_п$). Для пленок также справедливо равенство поверхностных плотностей ($m_з = m_п$).

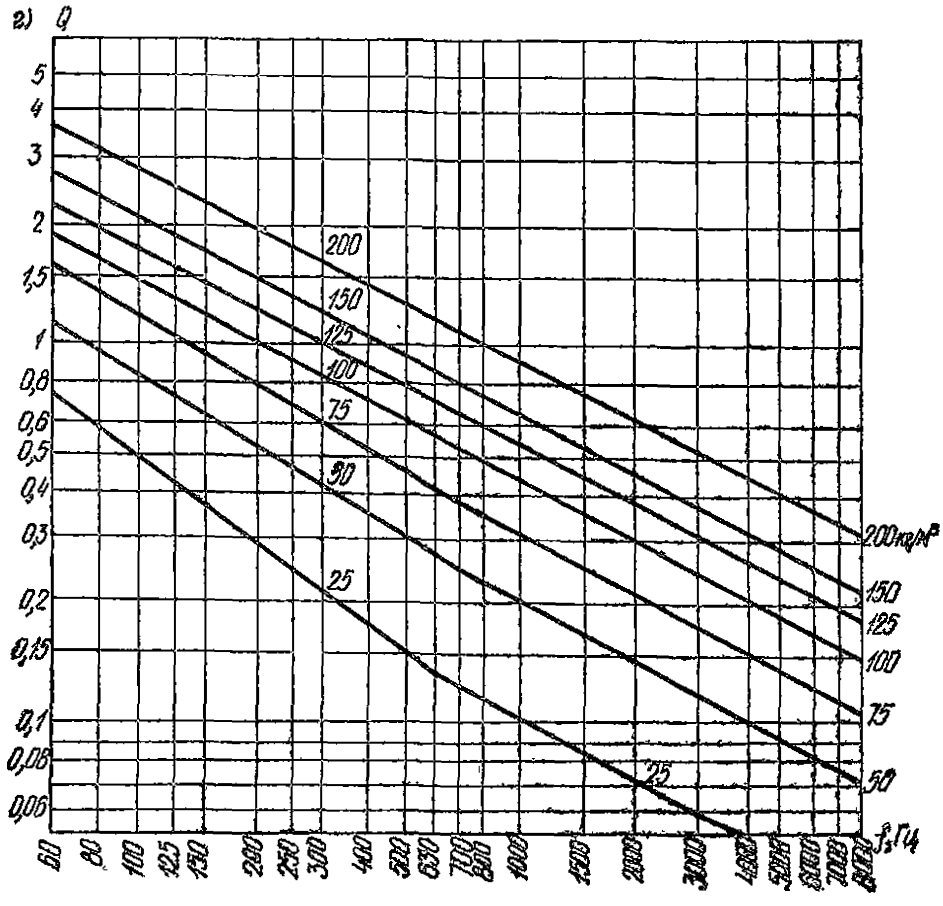
Соответствие импедансов перфорированных экранов соблюдается при одновременном выполнении двух условий: $D_з = D_п$ и $\eta_з = \eta_п$.

НОМОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТЫХ И ВОЛОКНИСТЫХ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ






в) Q
6
5
4
3
2
1,5
1
0,8
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,15
0,1
0,05
200
150
125
100
75
50
25
60
80
100
125
150
200
250
300
400
500
600
700
800
1000
1500
2000
3000
4000
5000
6000
7000
8000
f, Гц


г) Q
5
4
3
2
1,5
1
0,8
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,15
0,1
0,08
0,06
200
150
125
100
75
50
25
60
80
100
125
150
200
250
300
400
500
630
700
800
1000
1500
2000
3000
4000
5000
6300
7000
8000
f, Гц

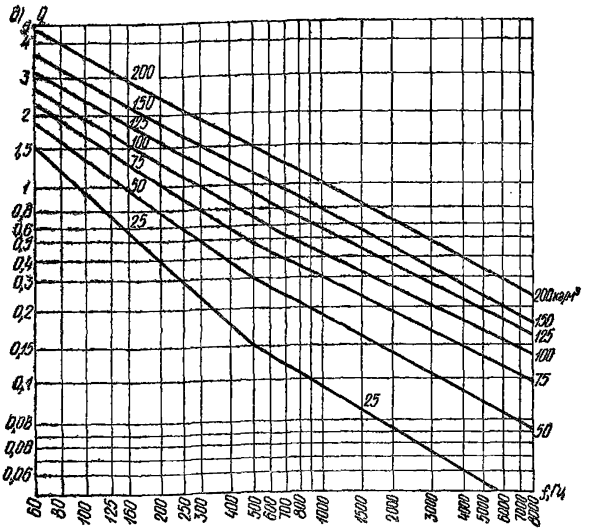


Рис. 1. Частотные зависимости структурных характеристик, рассчитанные для различной плотности

а — ультратонкого базальтового волокна (ТУ 550-2-44-72); *б* — супертонкого стеклянного волокна (ТУ 21-01-224-75); *в* — минеральной ваты (ТУ 21-24-51-73); *г* — штапельного стеклянного волокна (ГОСТ 10499—67); *д* — капронового волокна марки ВТ-4 (ТУ 6-06-272-70)

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ИМПЕДАНСА И КОЭФФИЦИЕНТА ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ СЛОЯ МАТЕРИАЛА БЕЗ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ

```
C:      ДС СМ
 2.10 ASK "Q1?" Q1, "Q2?" Q2, "BL?", BL, "BH?", BH
 2.40 SET T=0.785
 2.50 SET B = 1 + Q1; SET A = Q2 * (2 + Q2)/B
 2.60 SET G = A^2 + B^2; SET RS = (FSIN(T)/G)^2
 2.70 SET CH = 1 + RS * (A^2 — B^2);
      SET CT = 2 * RS * A * B; SET K1 = CT/CH
 2.80 SET MT = FSQT(FSQT(CH^2 + CT^2))
 2.90 SET J = —0.5 * FSBR(90,K1)
 3.10 SET AR = MT * FCOS(J); SET AY = MT * FSIN(J)
 3.20 SET 0 = 1/FEXP(2 * BL * (A * AR — B * AY));
      SET X = (1 — 0)/(1 + 0)
 3.30 SET L1 = BL * (A * AY + B * AR); SET L2 = BH * FCOS(T)
```

```
3.40 SET Y = FSIN(L1)/FCOS(L1); SET S = FSIN(L2)/FCOS(L2)
3.50 SET E = AR — X * Y * AY — S * (—X * Q2 + B * Y) * FCOS(T)
3.60 SET EN = AY + X * Y * AR + S * (X * B + Q2 * Y) * FCOS(T)
3.70 SET U = X * AR — Y * AY — S * (X * Y * B — Q2) * FCOS(T)
3.80 SET UN = X * AY + Y * AR + S * (B + X * Y * Q2) * FCOS(T)
4.10 SET M = ((B^2 + Q2^2) * (E^2 + EN^2))/((U^2 +
     + UN^2) * MT)
4.15 SET MU = (FCOS(T)) * (FSQT(M))
4.20 SET Z = FSBR (90, — Q2/B) + FSBR (90, EN/E) —
     — FSBR (90, UN/U) — J
4.30 SET R = MU * FCOS(Z); SET U = MU * FSIN(Z)
4.40 SET C = 4 * R/((R + 1)^2 + U^2)
5.10 OL
5.20 T %8.03, Q1, Q2, BL, BH,!
5.30 T %8.03, R, U, C,!
5.40 OT
5.50 QUIT
90.01 C ATAN; FSBR(90, ARG)
90.10 I (&^2 — 01)90.2; S & = &/(1 + FSQT (&^2 + 1));
      D 90; S & = 2 * &; R
90.20 S &=& — &^3/3 + &^5/5 — &^7/7
```

1. Условные обозначения:

Q1, Q2 — структурные характеристики материала;

BL=kl, где k — волновое число в воздухе, $см^{-1}$, l — толщина слоя материала, см;

BH=kL, где L — глубина воздушного зазора за слоем материала, см;

T — угол падения звуковой волны, рад.;

R, U — действительная и мнимая компоненты импеданса звукопоглощающей конструкции соответственно;

C — коэффициент звукопоглощения.

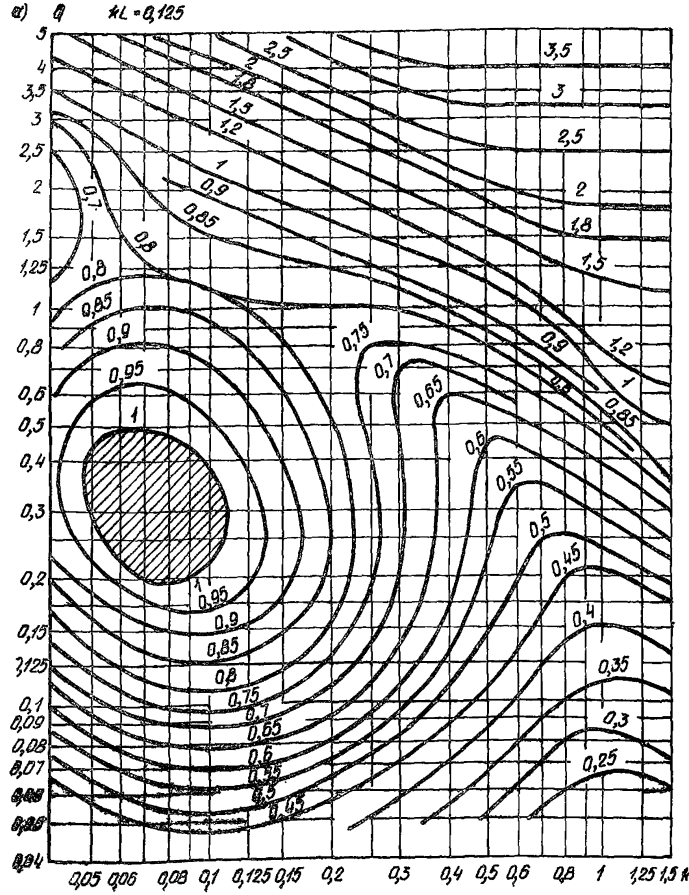
2. Диффузный коэффициент звукопоглощения вычисляют согласно п. 2.8.

3. Проверка

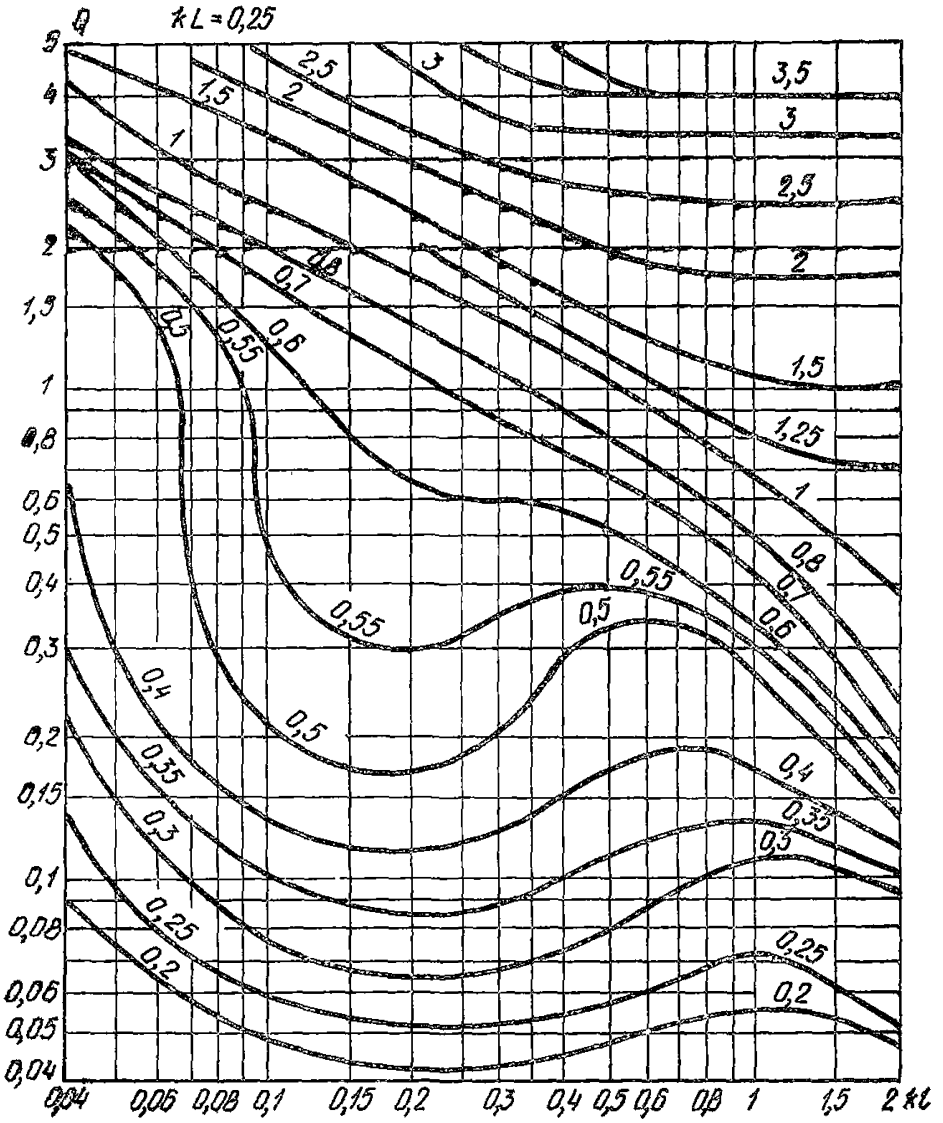
ВВОД: *Q1*=4.3 *Q2*=4.3 *BL*=0.058 *BH*=0.115.

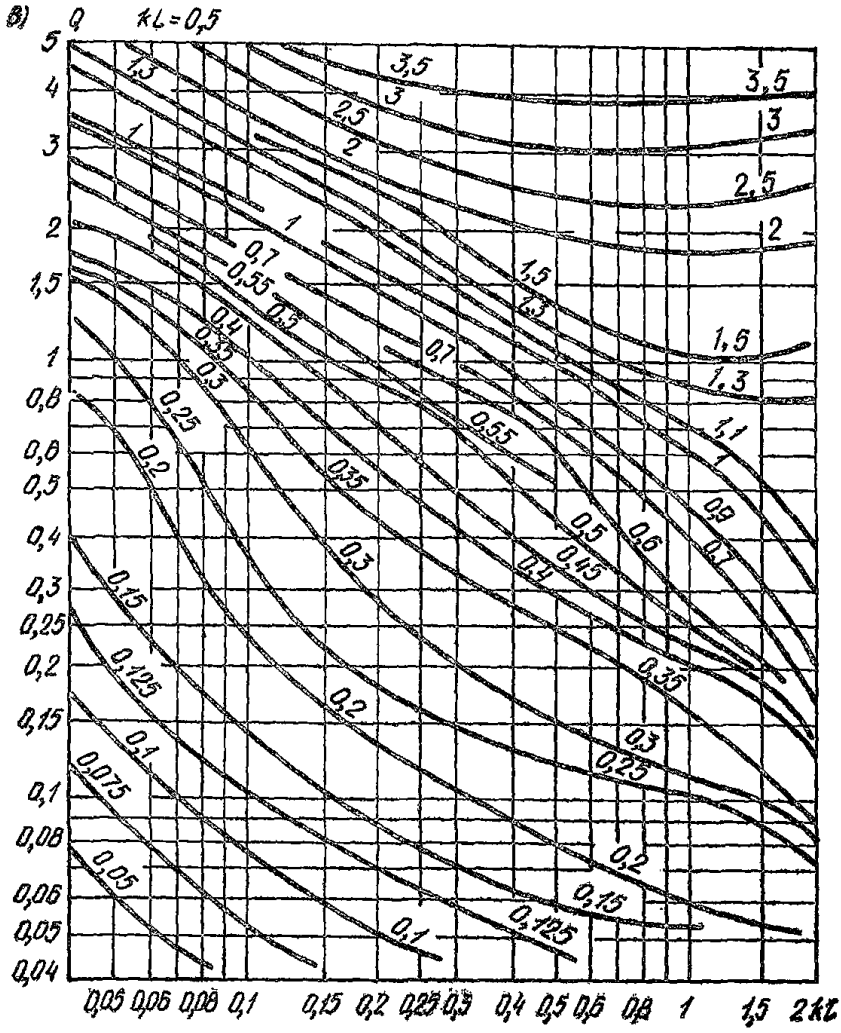
ВЫВОД: R=1,459 U=—5,744 C=0,149.

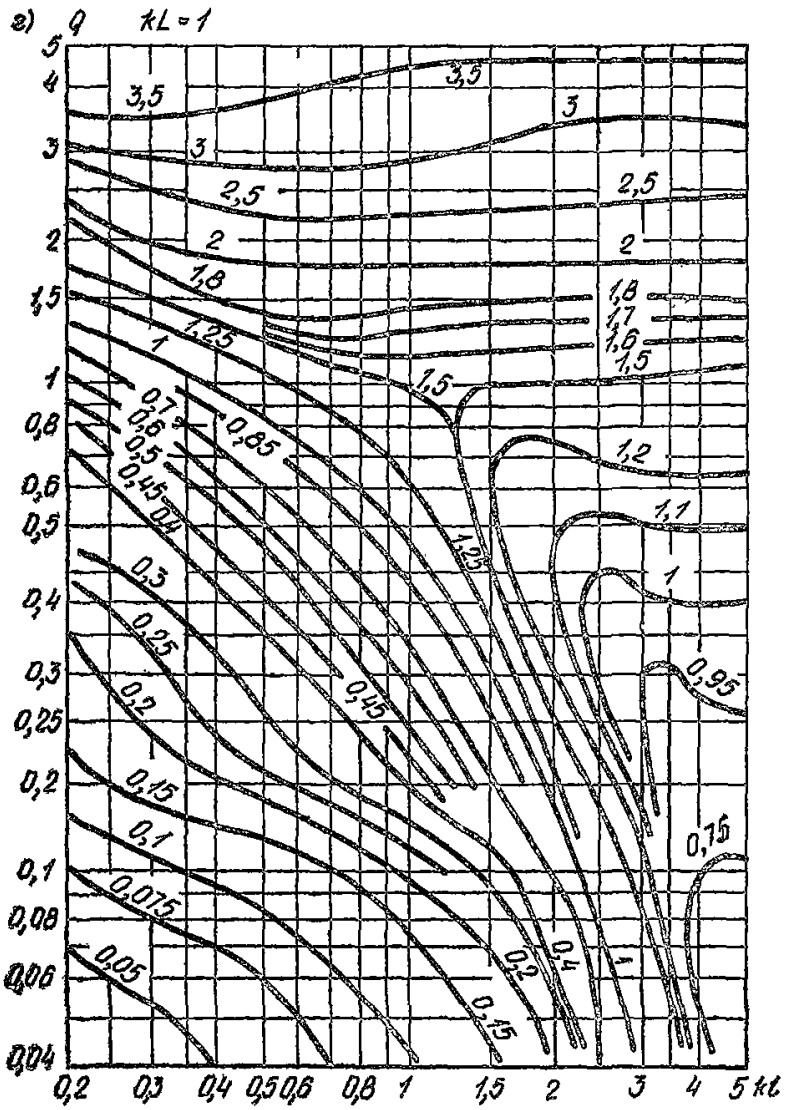
НОМОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИМПЕДАНСА И КОЭФФИЦИЕНТА ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ СЛОЯ ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА, РАСПОЛОЖЕННОГО НА ОТНОСЕ ОТ ЖЕСТКОГО ОСНОВАНИЯ



б)


Q
kL = 0,25
9
4
3
2
1,9
1
0,8
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,15
0,1
0,08
0,06
0,05
0,04
0,04
0,06
0,08
0,1
0,15
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,8
1
1,5
2
kl
2,5
3
3,5
1,5
2
1
0,8
0,7
0,6
0,55
0,5
0,4
0,35
0,3
0,25
0,2


в) Q kL = 0,5
5
4
3
2
1,5
1
0,8
0,6
0,5
0,4
0,3
0,25
0,2
0,15
0,1
0,08
0,06
0,05
0,04
0,05 0,06 0,08 0,1 0,15 0,2 0,25 0,3 0,4 0,5 0,6 0,8 1 1,5 2 kL


а) Q kL = 1
5
4
3
2
1,5
1
0,8
0,6
0,5
0,4
0,3
0,25
0,2
0,1
0,08
0,06
0,04
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,8
1
1,5
2
3
4
5 kL
3,5
3
2,5
2
1,8
1,25
1
0,7
0,6
0,5
0,45
0,4
0,3
0,25
0,2
0,15
0,1
0,075
0,05
0,85
1,25
0,45
0,2
0,15
0,4
1
1,8
1,7
1,6
1,5
1,2
1,1
1
0,95
0,75

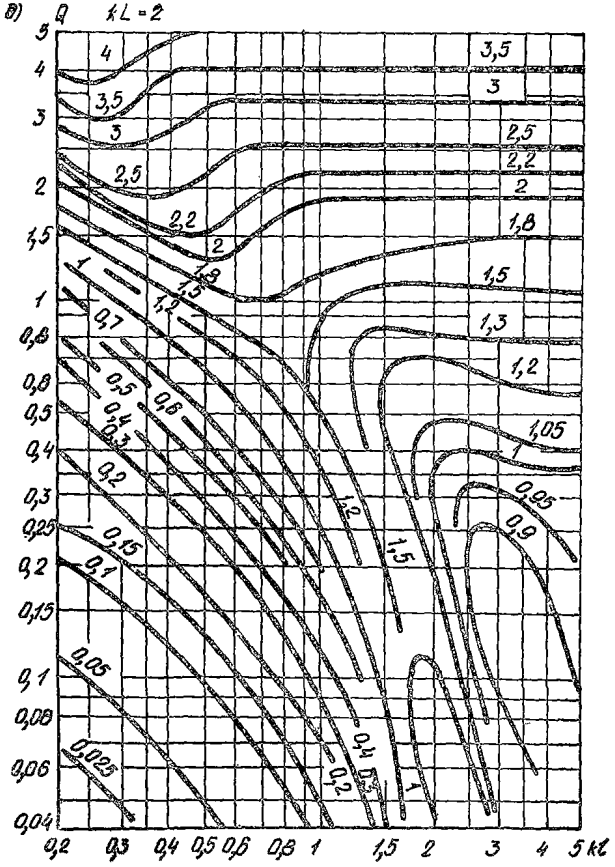


Рис. 1. Номограмма для определения действительной компоненты $R_{оа}$ импеданса слоя волокнистого материала толщиной l, см, расположенного на воздушном промежутке глубиной L, см, при падении звуковой волны под углом 45°

а—$kL=0{,}125$; *б*—$kL=0{,}25$; *в*—$kL=0{,}5$; *г*—$kL=1$; *д*—$kL=2$

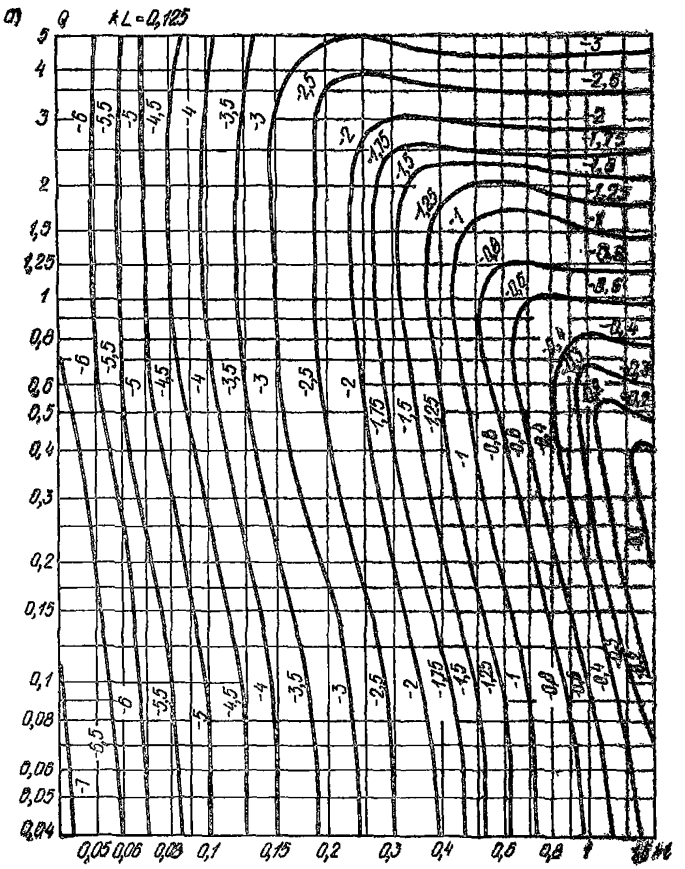
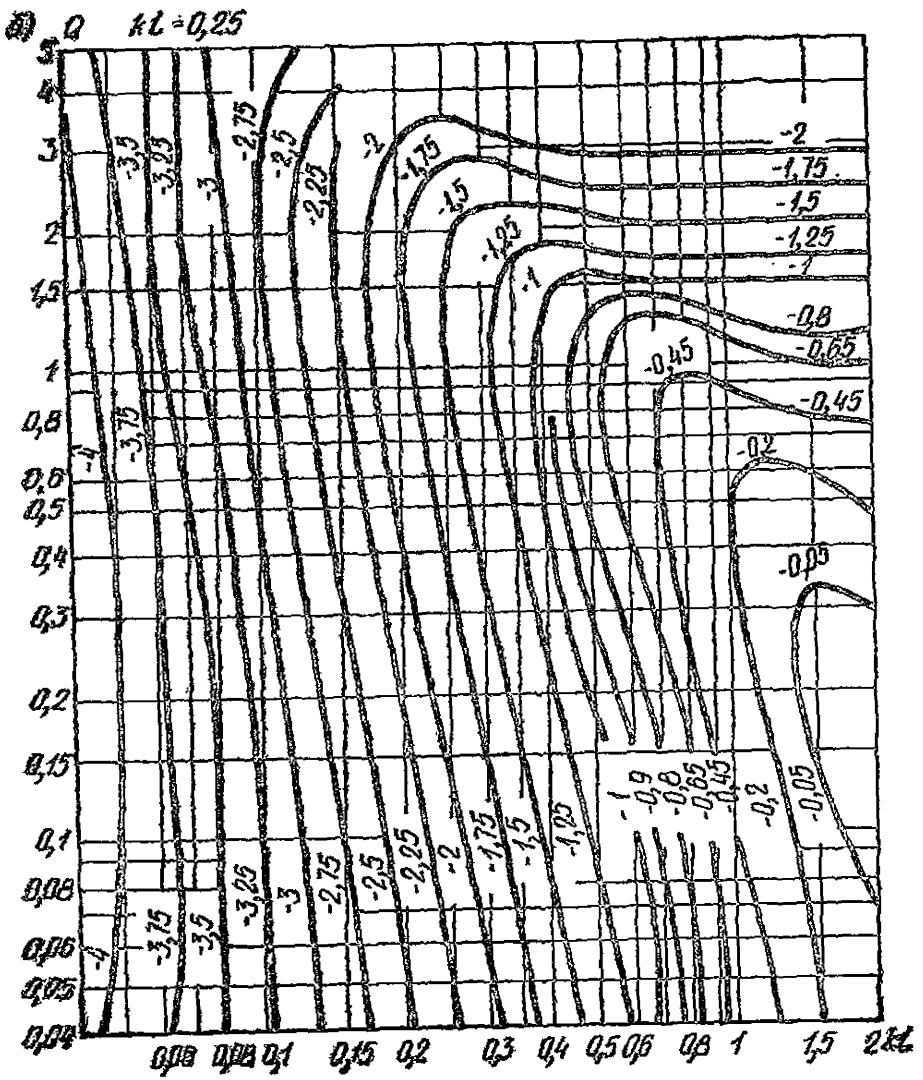
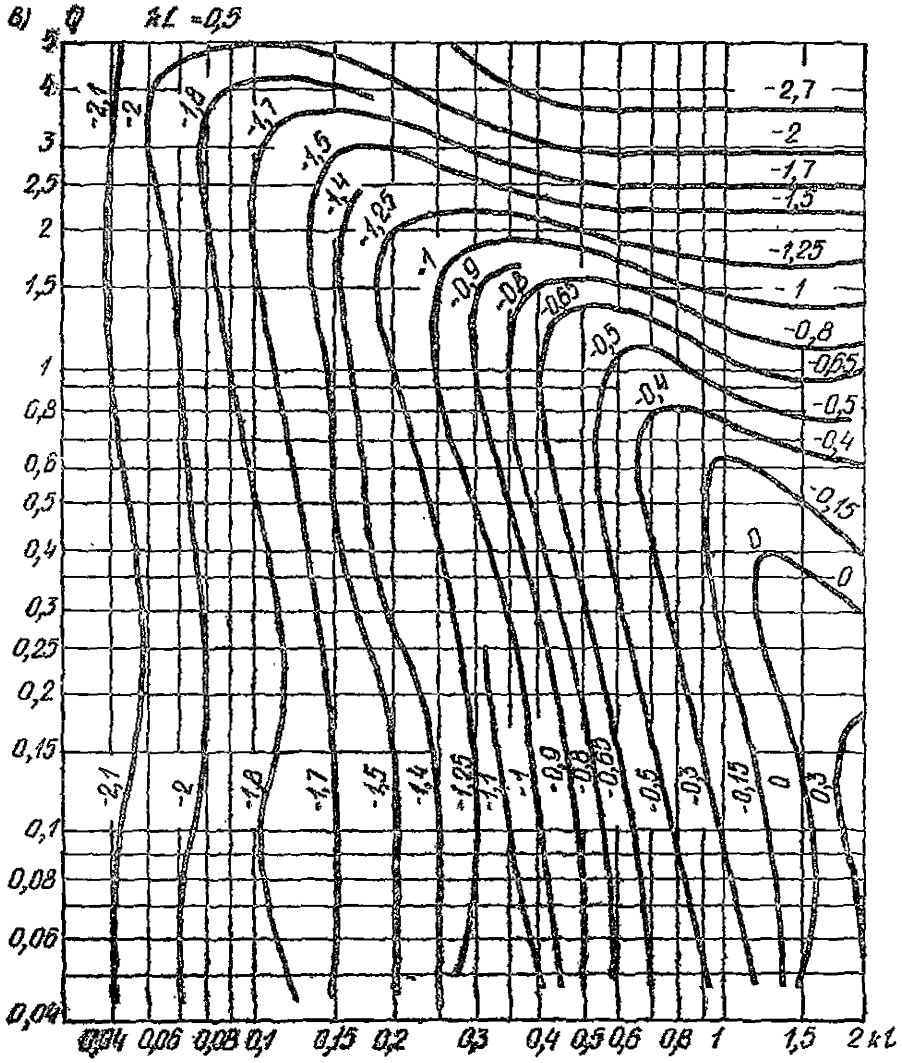
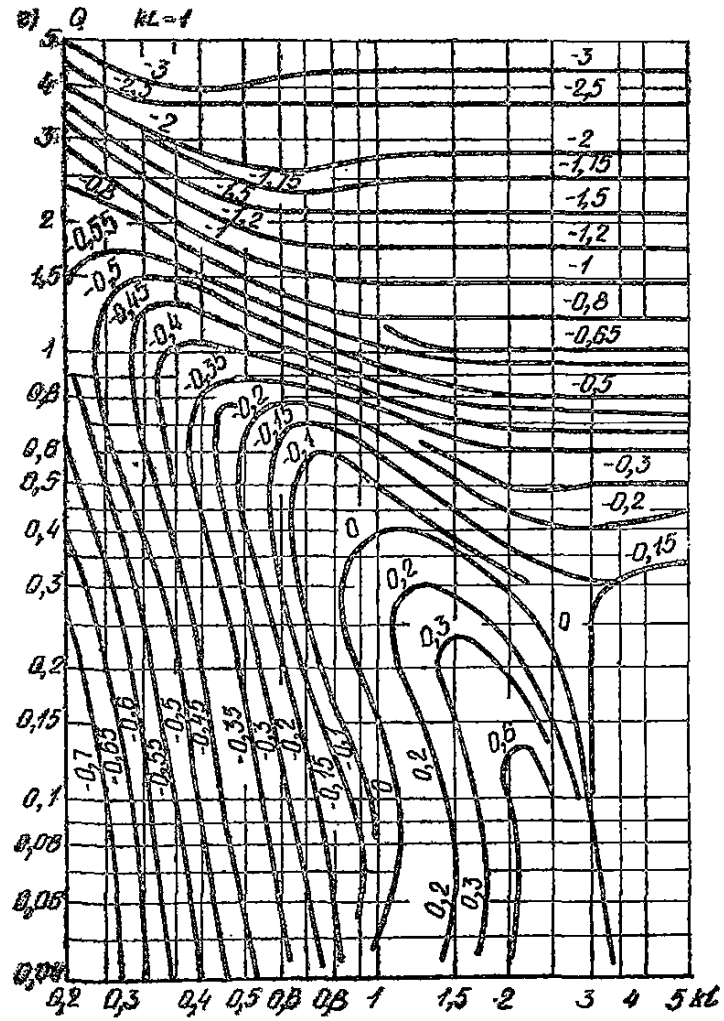


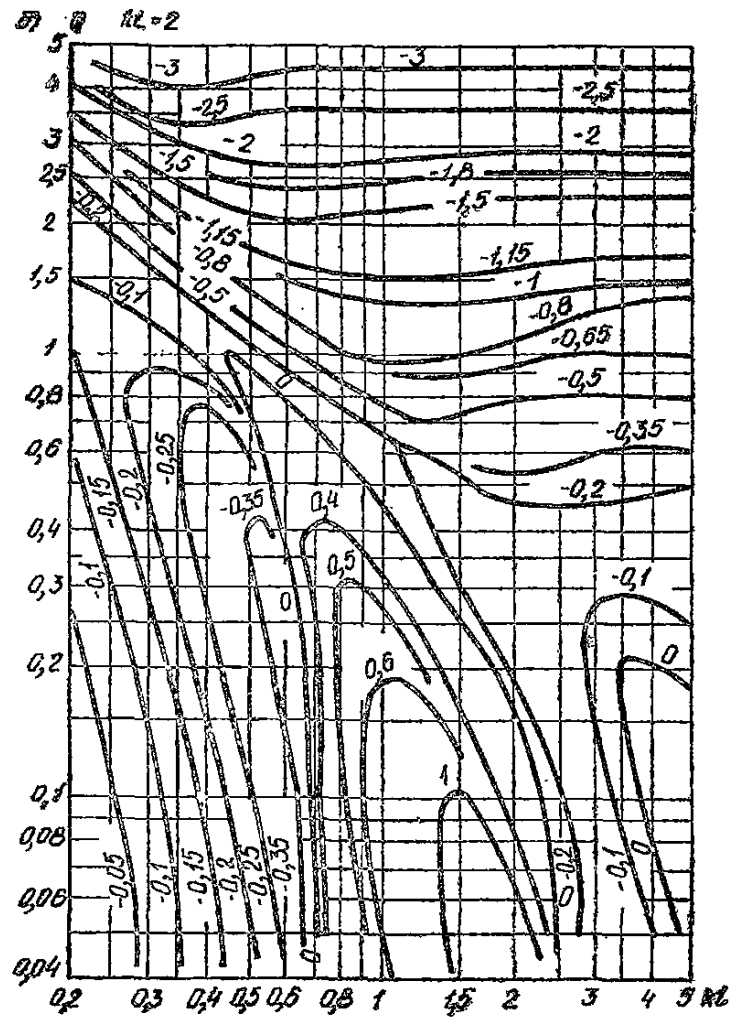
Рис. 2. Номограмма для определения мнимой компоненты $Y_{сл}$ импеданса слоя волокнистого материала толщиной l, см, расположенного на воздушном промежутке глубиной L, см, при падении звуковой волны под углом 45°

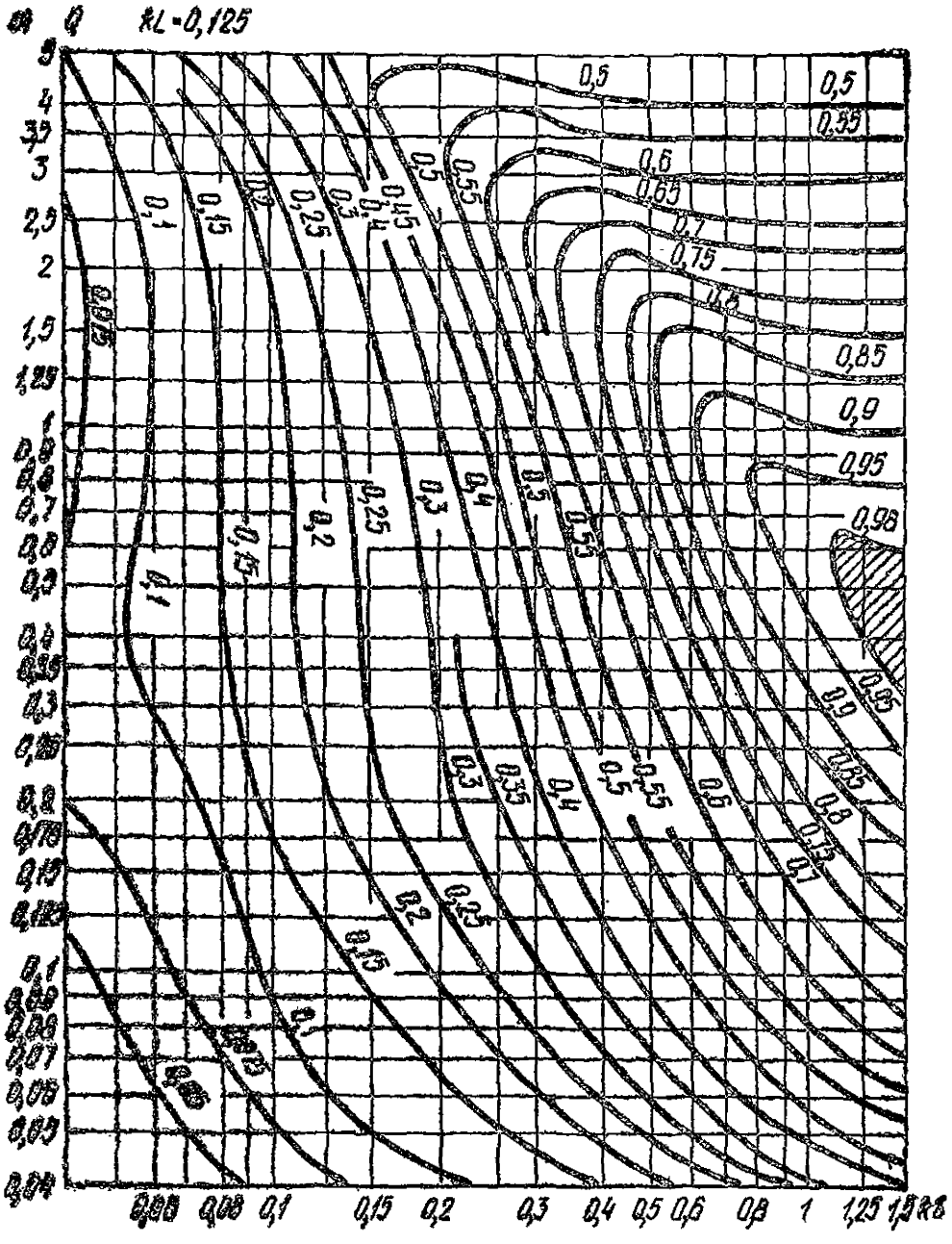
а—$kL=0{,}125$; *б*—$kL=0{,}25$; *в*—$kL=0{,}5$; *г*—$kL=1$; *д*—$kL=2$

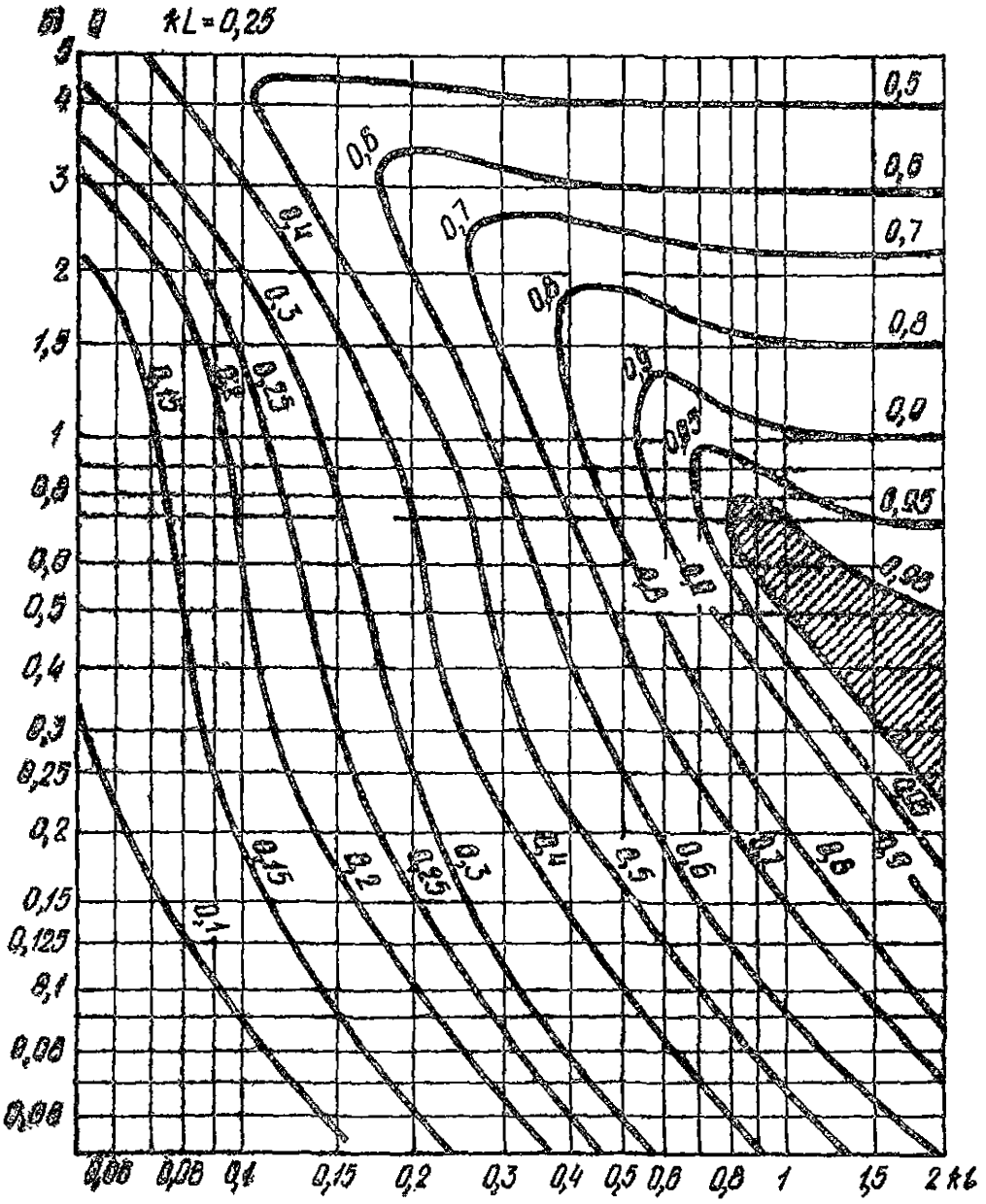

а) Q kL=0,25
5
4
3
2
1,5
1
0,8
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,15
0,1
0,08
0,06
0,05
0,04
0,06 0,08 0,1 0,15 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,8 1 1,5 2kL
-4
-3,75
-3,5
-3,25
-3
-2,75
-2,5
-2,25
-2
-1,75
-1,5
-1,25
-1
-0,9
-0,8
-0,65
-0,45
-0,2
-0,05

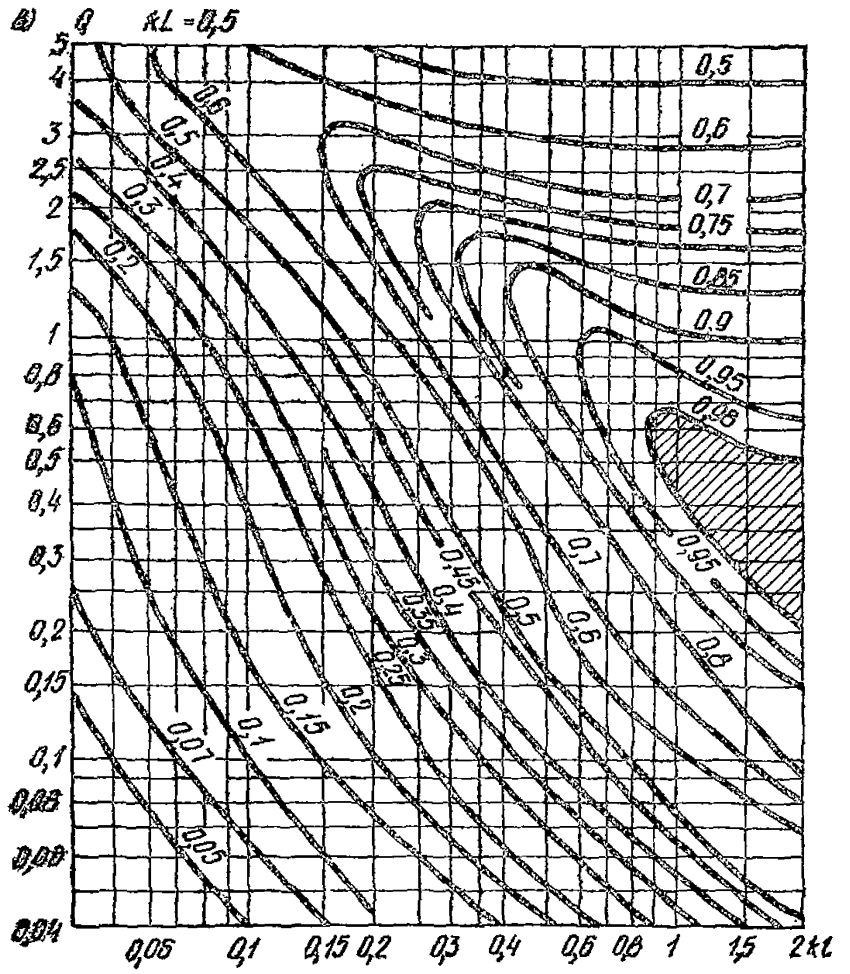

в) Q kL=0,3
5
4
3
2,5
2
1,5
1
0,8
0,6
0,5
0,4
0,3
0,25
0,2
0,15
0,1
0,08
0,06
0,04
0,04 0,06 0,08 0,1 0,15 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,8 1 1,5 2kL
-2,7
-2,1
-2
-1,8
-1,7
-1,5
-1,4
-1,25
-1,1
-1
-0,9
-0,8
-0,65
-0,5
-0,4
-0,3
-0,15
0
0,3

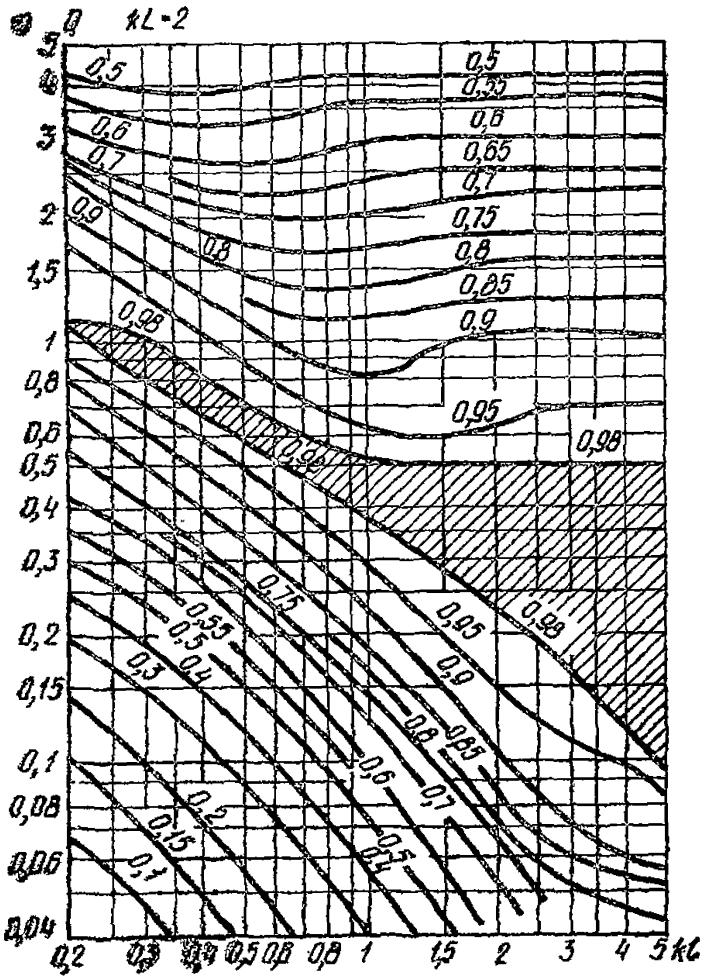

а) Q kL=1
5
4
3
2,5
2
1,5
1
0,8
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,15
0,1
0,08
0,06
0,04
0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,8 1 1,5 2 3 4 5 kL


б) Q kL=2
5
4
3
2,5
2
1,5
1
0,8
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,08
0,06
0,04
0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,8 1 1,5 2 3 4 5 kL


Q
kL=0,125
0,5
0,55
0,6
0,65
0,7
0,75
0,8
0,85
0,9
0,95
0,98
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,4
0,45
0,5
0,55
0,6
0,8
1
1,25
1,5


kL=0,25
5
4
3
2
1,5
1
0,9
0,8
0,5
0,4
0,3
0,25
0,2
0,15
0,125
0,1
0,08
0,06
0,06
0,08
0,1
0,15
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,8
1
1,5
2 kL
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
0,95
0,98
0,1
0,15
0,2
0,25
0,3
0,4
0,5
0,6
0,8
0,9


а) Q kL=0,5
5
4
3
2,5
2
1,5
1
0,8
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,15
0,1
0,08
0,06
0,04
0,05 0,1 0,15 0,2 0,3 0,4 0,6 0,8 1 1,5 2 kL
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,5
0,6
0,7
0,75
0,85
0,9
0,95
0,98
0,45
0,35
0,25
0,15
0,1
0,07
0,05


б) Q kL=2
5
4
3
2
1,5
1
0,8
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,15
0,1
0,08
0,06
0,04
0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,8 1 1,5 2 3 4 5 kL
0,5
0,6
0,7
0,9
0,98
0,55
0,65
0,75
0,85
0,95
0,4
0,3
0,2
0,15
0,1

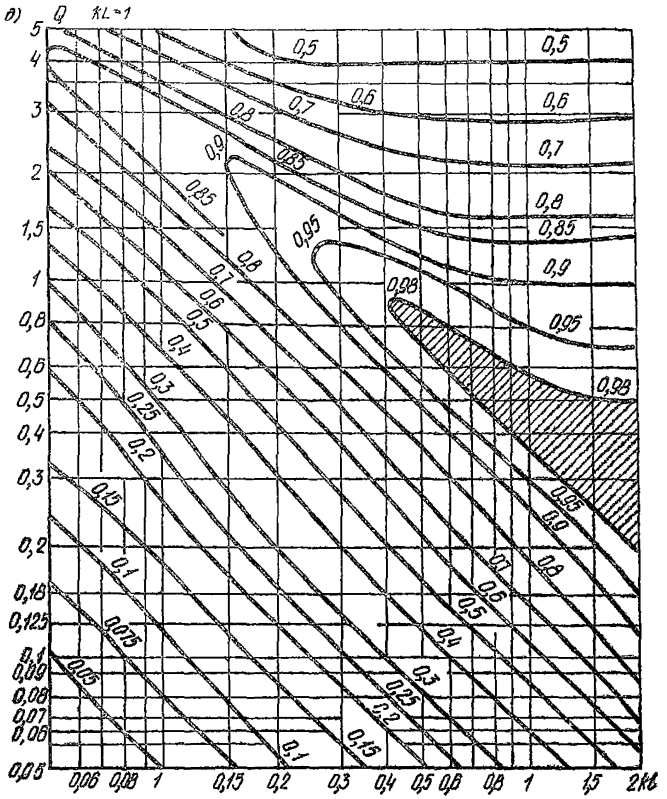


Рис. 3. Номограмма для определения коэффициента звукопоглощения $\alpha_{сл}$ слоя волокнистого материала толщиной l, см, расположенного на воздушном промежутке глубиной L, см, при падении звуковой волны под углом 45°

а—$kL=0{,}125$; *б*—$kL=0{,}25$; *в*—$kL=0{,}5$; *г*—$kL=1$; *д*—$kL=2$

ЧАСТОТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИФФУЗНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ОБЛИЦОВОК

Толщина слоя, мм	Глубина воздушного зазора, мм	Марка ткани (табл. 4)	Перфорированный экран (табл. 5)	Диффузный коэффициент звукопоглощения на частотах, Гц							
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
I. Ультратонкое штапельное базальтовое волокно плотностью 20 кг/м³ с диаметром волокна 1 мкм (ТУ 550-2-44-72)											
25	0	—	—	0,02	0,05	0,15	0,40	0,75	0,96	0,98	0,99
25	0	ТСТ-6	1	0,02	0,06	0,18	0,48	0,89	0,96	0,77	0,39
25	0	ТСТ-6	2	0,02	0,06	0,18	0,47	0,85	0,98	0,89	0,61
25	0	ТСТ-6	3	0,02	0,06	0,18	0,46	0,83	0,98	0,95	0,83
25	0	Э3-100	1	0,02	0,07	0,20	0,52	0,84	0,90	0,65	0,31
25	0	Э3-100	2	0,02	0,07	0,20	0,51	0,81	0,94	0,77	0,46
25	0	Э3-100	3	0,02	0,07	0,20	0,50	0,80	0,96	0,86	0,64
25	25	—	—	0,02	0,08	0,23	0,58	0,91	0,92	0,95	0,99
25	25	ТСТ-6	1	0,03	0,09	0,27	0,69	0,97	0,9	0,81	0,38
25	25	ТСТ-6	2	0,03	0,09	0,27	0,67	0,96	0,91	0,92	0,61
25	25	ТСТ-6	3	0,03	0,09	0,27	0,66	0,94	0,91	0,96	0,83
25	25	Э3-100	1	0,03	0,10	0,32	0,72	0,95	0,84	0,68	0,31
25	25	Э3-100	2	0,03	0,10	0,31	0,71	0,95	0,86	0,79	0,47
25	25	Э3-100	3	0,03	0,1	0,31	0,7	0,94	0,87	0,87	0,64
25	50	—	—	0,03	0,11	0,34	0,75	0,93	0,87	0,98	0,99
25	50	ТСТ-6	1	0,04	0,14	0,41	0,84	0,91	0,88	0,77	0,38
25	50	ТСТ-6	2	0,04	0,14	0,41	0,82	0,91	0,88	0,90	0,62
25	50	ТСТ-6	3	0,04	0,14	0,40	0,80	0,91	0,87	0,96	0,83
25	50	Э3-100	1	0,04	0,15	0,45	0,80	0,88	0,73	0,63	0,31
25	50	Э3-100	2	0,04	0,15	0,44	0,78	0,88	0,74	0,76	0,47
25	50	Э3-100	3	0,04	0,15	0,44	0,77	0,88	0,74	0,86	0,64
25	100	—	—	0,06	0,21	0,57	0,86	0,87	0,87	0,98	0,99
25	100	ТСТ-6	1	0,07	0,25	0,65	0,97	0,91	0,98	0,77	0,38
25	100	ТСТ-6	2	0,07	0,25	0,64	0,92	0,92	0,97	0,90	0,62
25	100	ТСТ-6	3	0,07	0,25	0,63	0,91	0,92	0,96	0,96	0,83
25	100	Э3-100	1	0,08	0,28	0,68	0,94	0,80	0,96	0,63	0,31
25	100	Э3-100	2	0,08	0,28	0,67	0,93	0,81	0,96	0,76	0,47
25	100	Э3-100	3	0,08	0,28	0,67	0,92	0,81	0,96	0,86	0,64
25	250	—	—	0,20	0,57	0,83	0,83	0,74	0,91	0,98	0,99
25	250	ТСТ-6	1	0,24	0,63	0,83	0,85	0,89	0,97	0,77	0,38
25	250	ТСТ-6	2	0,24	0,63	0,83	0,83	0,89	0,96	0,90	0,62
25	250	ТСТ-6	3	0,24	0,62	0,83	0,82	0,88	0,95	0,96	0,83
25	250	Э3-100	1	0,24	0,66	0,81	0,85	0,91	0,93	0,63	0,31
25	250	Э3-100	2	0,24	0,66	0,81	0,84	0,9	0,94	0,76	0,47
25	250	Э3-100	3	0,24	0,65	0,81	0,83	0,9	0,95	0,86	0,64
25	500	—	—	0,34	0,77	0,90	0,71	0,80	0,89	0,98	0,99
25	500	ТСТ-6	1	0,41	0,85	0,89	0,74	0,9	0,95	0,77	0,38
25	500	ТСТ-6	2	0,41	0,85	0,89	0,73	0,88	0,94	0,90	0,62
25	500	ТСТ-6	3	0,41	0,83	0,88	0,72	0,86	0,92	0,96	0,83
25	500	Э3-100	1	0,45	0,85	0,87	0,75	0,90	0,91	0,63	0,31
25	500	Э3-100	2	0,45	0,85	0,86	0,74	0,89	0,92	0,76	0,47
25	500	Э3-100	3	0,45	0,85	0,86	0,73	0,87	0,91	0,86	0,64
25	1000	—	—	0,71	0,93	0,69	0,70	0,81	0,90	0,98	0,99
25	1000	ТСТ-6	1	0,77	0,91	0,73	0,69	0,77	0,98	0,77	0,38
25	1000	ТСТ-6	2	0,77	0,91	0,72	0,68	0,76	0,97	0,90	0,62
25	1000	ТСТ-6	3	0,78	0,91	0,71	0,68	0,75	0,96	0,96	0,83
25	1000	Э3-100	1	0,80	0,87	0,75	0,67	0,76	0,93	0,63	0,31
25	1000	Э3-100	2	0,80	0,89	0,74	0,67	0,75	0,96	0,76	0,47
25	1000	Э3-100	3	0,80	0,89	0,73	0,67	0,75	0,93	0,86	0,64
50	0	—	—	0,05	0,16	0,44	0,78	0,91	0,94	0,98	0,99
50	0	ТСТ-6	1	0,06	0,18	0,49	0,83	0,93	0,94	0,77	0,38
50	0	ТСТ-6	2	0,06	0,18	0,48	0,81	0,92	0,95	0,90	0,61
50	0	ТСТ-6	3	0,06	0,18	0,48	0,80	0,91	0,94	0,96	0,83
50	0	Э3-100	1	0,06	0,20	0,52	0,83	0,91	0,88	0,64	0,31

Толщина слоя, мм	Глубина воздушного зазора, мм	Марка ткани (табл. 4)	Перфорированный экран (табл. 5)	Диффузный коэффициент звукопоглощения на частотах, Гц							
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
50	0	ЭЗ-100	2	0,06	0,20	0,51	0,82	0,9	0,91	0,76	0,47
50	0	ЭЗ-100	3	0,06	0,20	0,50	0,82	0,9	0,92	0,85	0,64
50	25	—	—	0,07	0,22	0,55	0,84	0,90	0,94	0,98	0,99
50	25	ТСТ-6	1	0,08	0,25	0,61	0,86	0,91	0,94	0,77	0,38
50	25	ТСТ-6	2	0,08	0,25	0,60	0,85	0,9	0,95	0,9	0,61
50	25	ТСТ-6	3	0,08	0,25	0,59	0,84	0,89	0,95	0,96	0,83
50	25	ЭЗ-100	1	0,09	0,27	0,62	0,89	0,89	0,89	0,63	0,31
50	25	ЭЗ-100	2	0,09	0,27	0,61	0,85	0,89	0,91	0,76	0,47
50	25	ЭЗ-100	3	0,09	0,27	0,61	0,84	0,88	0,92	0,85	0,64
50	50	—	—	0,09	0,29	0,65	0,82	0,84	0,94	0,98	0,99
50	50	ТСТ-6	1	0,10	0,33	0,69	0,82	0,85	0,95	0,77	0,38
50	50	ТСТ-6	2	0,10	0,33	0,68	0,82	0,84	0,95	0,90	0,61
50	50	ТСТ-6	3	0,10	0,33	0,67	0,81	0,83	0,95	0,96	0,83
50	50	ЭЗ-100	1	0,12	0,35	0,70	0,81	0,83	0,89	0,63	0,31
50	50	ЭЗ-100	2	0,12	0,35	0,69	0,81	0,83	0,91	0,76	0,47
50	50	ЭЗ-100	3	0,12	0,34	0,69	0,81	0,83	0,89	0,85	0,64
50	100	—	—	0,14	0,43	0,77	0,8	0,81	0,94	0,98	0,99
50	100	ТСТ-6	1	0,17	0,47	0,78	0,78	0,85	0,94	0,77	0,38
50	100	ТСТ-6	2	0,17	0,47	0,77	0,78	0,83	0,95	0,90	0,61
50	100	ТСТ-6	3	0,17	0,47	0,77	0,78	0,82	0,95	0,96	0,83
50	100	ЭЗ-100	1	0,18	0,49	0,77	0,76	0,84	0,88	0,63	0,31
50	100	ЭЗ-100	2	0,18	0,49	0,77	0,76	0,83	0,91	0,76	0,47
50	100	ЭЗ-100	3	0,18	0,49	0,77	0,76	0,83	0,91	0,85	0,64
100	0	—	—	0,19	0,42	0,74	0,82	0,96	0,98	0,99	0,99
100	0	ТСТ-6	1	0,21	0,51	0,74	0,82	0,91	0,94	0,77	0,38
100	0	ТСТ-6	2	0,21	0,50	0,74	0,81	0,90	0,95	0,90	0,61
100	0	ТСТ-6	3	0,21	0,50	0,73	0,80	0,88	0,95	0,96	0,83
100	0	ЭЗ-100	1	0,22	0,52	0,73	0,81	0,89	0,88	0,63	0,31
100	0	ЭЗ-100	2	0,22	0,52	0,73	0,80	0,89	0,91	0,76	0,47
100	0	ЭЗ-100	3	0,22	0,51	0,73	0,80	0,88	0,92	0,85	0,64
		2. Супертонкое стеклянное волокно плотностью 15 кг/м³ с диаметром волокна 2 мкм (ТУ 21-01-224-75)									
25	0	—	—	0,03	0,07	0,17	0,37	0,66	0,9	0,99	0,99
25	0	ТСТ-6	1	0,03	0,08	0,20	0,46	0,85	0,97	0,65	0,37
25	0	ТСТ-6	2	0,03	0,08	0,20	0,45	0,81	0,99	0,77	0,58
25	0	ТСТ-6	3	0,03	0,08	0,19	0,44	0,80	0,99	0,91	0,80
25	0	ЭЗ-100	1	0,03	0,08	0,21	0,51	0,91	0,9	0,51	0,29
25	0	ЭЗ-100	2	0,03	0,08	0,21	0,49	0,88	0,96	0,64	0,44
25	0	ЭЗ-100	3	0,03	0,08	0,21	0,48	0,85	0,98	0,75	0,62
25	25	—	—	0,03	0,08	0,20	0,46	0,80	0,93	0,98	0,99
25	25	ТСТ-6	1	0,03	0,10	0,24	0,61	0,97	0,9	0,76	0,36
25	25	ТСТ-6	2	0,03	0,10	0,23	0,59	0,95	0,95	0,88	0,57
25	25	ТСТ-6	3	0,03	0,10	0,23	0,57	0,93	0,97	0,95	0,79
25	25	ЭЗ-100	1	0,04	0,10	0,29	0,68	0,99	0,83	0,63	0,34
25	25	ЭЗ-100	2	0,04	0,10	0,28	0,66	0,98	0,88	0,75	0,51
25	25	ЭЗ-100	3	0,04	0,10	0,28	0,64	0,97	0,92	0,84	0,60
25	50	—	—	0,03	0,09	0,25	0,58	0,83	0,92	0,97	0,99
25	50	ТСТ-6	1	0,04	0,12	0,34	0,75	0,98	0,90	0,76	0,35
25	50	ТСТ-6	2	0,04	0,12	0,33	0,73	0,98	0,85	0,90	0,55
25	50	ТСТ-6	3	0,04	0,12	0,33	0,71	0,98	0,87	0,97	0,77
25	50	ЭЗ-100	1	0,04	0,14	0,39	0,82	0,99	0,74	0,61	0,28
25	50	ЭЗ-100	2	0,04	0,14	0,38	0,80	0,99	0,78	0,75	0,42
25	50	ЭЗ-100	3	0,04	0,14	0,38	0,78	0,99	0,81	0,85	0,58
25	100	—	—	0,04	0,13	0,37	0,67	0,92	0,84	0,99	0,99
25	100	ТСТ-6	1	0,06	0,18	0,52	0,87	0,95	0,98	0,66	0,35
25	100	ТСТ-6	2	0,06	0,18	0,51	0,86	0,97	0,95	0,81	0,55
25	100	ТСТ-6	3	0,06	0,18	0,5	0,83	0,98	0,92	0,91	0,77
25	100	ЭЗ-100	1	0,07	0,22	0,59	0,93	0,94	0,95	0,54	0,28

Толщина слоя, мм	Глубина воздушного завора, мм	Марка ткани (табл. 4)	Перфорированный экран (табл. 5)	Диффузный коэффициент звукопоглощения на частотах, Гц							
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
25	100	ЭЗ-100	2	0,07	0,22	0,58	0,91	0,96	0,96	0,66	0,42
25	100	ЭЗ-100	3	0,07	0,22	0,57	0,90	0,98	0,95	0,76	0,58
25	250	—	—	0,07	0,24	0,58	0,76	0,86	0,93	0,99	0,99
25	250	ТСТ-6	1	0,12	0,41	0,79	0,94	0,98	0,94	0,66	0,35
25	250	ТСТ-6	2	0,12	0,4	0,79	0,92	0,96	0,98	0,81	0,55
25	250	ТСТ-6	3	0,12	0,4	0,77	0,91	0,94	0,99	0,91	0,77
25	250	ЭЗ-100	1	0,15	0,47	0,87	0,94	0,99	0,86	0,54	0,28
25	250	ЭЗ-100	2	0,15	0,47	0,85	0,93	0,98	0,93	0,66	0,42
25	250	ЭЗ-100	3	0,15	0,47	0,85	0,92	0,97	0,96	0,76	0,58
25	500	—	—	0,16	0,48	0,81	0,82	0,86	0,78	0,99	0,99
25	500	ТСТ-6	1	0,28	0,74	0,96	0,94	0,99	0,9	0,7	0,35
25	500	ТСТ-6	2	0,28	0,74	0,96	0,93	0,98	0,85	0,83	0,55
25	500	ТСТ-6	3	0,28	0,74	0,96	0,91	0,96	0,83	0,92	0,77
25	500	ЭЗ-100	1	0,34	0,8	0,99	0,97	0,99	0,91	0,57	0,28
25	500	ЭЗ-100	2	0,34	0,8	0,99	0,96	0,98	0,89	0,69	0,42
25	500	ЭЗ-100	3	0,34	0,79	0,99	0,95	0,98	0,87	0,78	0,58
25	1000	—	—	0,40	0,76	0,67	0,76	0,83	0,89	0,99	0,99
25	1000	ТСТ-6	1	0,68	0,98	0,82	0,85	0,98	0,8	0,66	0,35
25	1000	ТСТ-6	2	0,67	0,98	0,81	0,84	0,96	0,83	0,81	0,55
25	1000	ТСТ-6	3	0,67	0,98	0,8	0,82	0,94	0,84	0,91	0,77
25	1000	ЭЗ-100	1	0,77	0,99	0,86	0,88	0,99	0,75	0,54	0,28
25	1000	ЭЗ-100	2	0,74	0,99	0,85	0,87	0,99	0,78	0,66	0,42
25	1000	ЭЗ-100	3	0,74	0,99	0,85	0,85	0,98	0,80	0,76	0,58
50	0	—	—	0,06	0,15	0,38	0,71	0,95	0,99	0,99	0,99
50	0	ТСТ-6	1	0,06	0,18	0,45	0,83	0,99	0,91	0,72	0,35
50	0	ТСТ-6	2	0,06	0,18	0,44	0,81	0,99	0,95	0,86	0,55
50	0	ТСТ-6	3	0,06	0,18	0,44	0,79	0,98	0,97	0,95	0,77
50	0	ЭЗ-100	1	0,07	0,2	0,49	0,86	0,98	0,83	0,58	0,28
50	0	ЭЗ-100	2	0,07	0,2	0,48	0,84	0,98	0,88	0,71	0,42
50	0	ЭЗ-100	3	0,07	0,2	0,47	0,83	0,98	0,91	0,82	0,58
50	25	—	—	0,06	0,18	0,45	0,81	0,96	0,96	0,99	0,99
50	25	ТСТ-6	1	0,08	0,22	0,53	0,9	0,98	0,93	0,72	0,35
50	25	ТСТ-6	2	0,08	0,22	0,53	0,89	0,99	0,95	0,86	0,55
50	25	ТСТ-6	3	0,08	0,22	0,52	0,88	0,99	0,95	0,94	0,77
50	25	ЭЗ-100	1	0,08	0,24	0,58	0,93	0,95	0,86	0,57	0,28
50	25	ЭЗ-100	2	0,08	0,24	0,57	0,91	0,96	0,9	0,70	0,42
50	25	ЭЗ-100	3	0,08	0,24	0,57	0,90	0,97	0,91	0,81	0,58
50	50	—	—	0,07	0,21	0,53	0,85	0,97	0,96	0,99	0,99
50	50	ТСТ-6	1	0,09	0,26	0,63	0,95	0,91	0,93	0,72	0,35
50	50	ТСТ-6	2	0,09	0,26	0,62	0,94	0,92	0,96	0,86	0,55
50	50	ТСТ-6	3	0,09	0,26	0,61	0,93	0,93	0,96	0,94	0,77
50	50	ЭЗ-100	1	0,09	0,29	0,67	0,95	0,87	0,87	0,57	0,28
50	50	ЭЗ-100	2	0,09	0,29	0,66	0,94	0,88	0,92	0,70	0,42
50	50	ЭЗ-100	3	0,09	0,29	0,65	0,94	0,89	0,94	0,81	0,58
50	100	—	—	0,10	0,29	0,63	0,92	0,9	0,97	0,99	0,99
50	100	ТСТ-6	1	0,12	0,36	0,76	0,98	0,87	0,93	0,72	0,35
50	100	ТСТ-6	2	0,12	0,3	0,75	0,98	0,87	0,97	0,86	0,55
50	100	ТСТ-6	3	0,12	0,36	0,73	0,98	0,87	0,99	0,94	0,77
50	100	ЭЗ-100	1	0,14	0,4	0,8	0,99	0,85	0,85	0,57	0,28
50	100	ЭЗ-100	2	0,14	0,4	0,79	0,99	0,85	0,91	0,70	0,42
50	100	ЭЗ-100	3	0,14	0,4	0,78	0,99	0,85	0,95	0,81	0,58
100	0	—	—	0,15	0,4	0,76	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99
100	0	ТСТ-6	1	0,18	0,46	0,81	0,96	0,96	0,93	0,72	0,35
100	0	ТСТ-6	2	0,18	0,46	0,81	0,95	0,96	0,96	0,86	0,55
100	0	ТСТ-6	3	0,18	0,46	0,80	0,95	0,96	0,98	0,94	0,77
100	0	ЭЗ-100	1	0,19	0,49	0,83	0,94	0,93	0,85	0,57	0,28
100	0	ЭЗ-100	2	0,19	0,49	0,82	0,94	0,93	0,90	0,70	0,42
100	0	ЭЗ-100	3	0,19	0,49	0,81	0,94	0,94	0,90	0,81	0,58

Толщина слоя, мм	Глубина воздушного зазора, мм	Марка ткани (табл. 4)	Перфорированный экран (табл. 5)	Диффузный коэффициент звукопоглощения на частотах, Гц							
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
3. Минеральная вата плотностью 100 кг/м³ с диаметром волокна 8 мкм (ТУ 21-24-51-73)											
25	0	—	—	0,02	0,06	0,16	0,37	0,7	0,93	0,99	0,99
25	0	ТСТ-6	1	0,02	0,07	0,18	0,46	0,87	0,97	0,68	0,37
25	0	ТСТ-6	2	0,02	0,07	0,18	0,45	0,83	0,99	0,82	0,58
25	0	ТСТ-6	3	0,02	0,07	0,18	0,44	0,80	0,99	0,92	0,81
25	0	ЭЗ-100	1	0,03	0,08	0,2	0,51	0,92	0,9	0,55	0,29
25	0	ЭЗ-100	2	0,03	0,08	0,2	0,5	0,89	0,95	0,68	0,44
25	0	ЭЗ-100	3	0,03	0,08	0,2	0,49	0,86	0,98	0,78	0,61
25	25	—	—	0,02	0,07	0,21	0,51	0,82	0,93	0,97	0,99
25	25	ТСТ-6	1	0,03	0,09	0,26	0,64	0,99	0,90	0,77	0,37
25	25	ТСТ-6	2	0,03	0,09	0,25	0,63	0,97	0,95	0,89	0,58
25	25	ТСТ-6	3	0,03	0,09	0,25	0,62	0,93	0,99	0,96	0,81
25	25	ЭЗ-100	1	0,03	0,10	0,3	0,7	0,99	0,8	0,59	0,29
25	25	ЭЗ-100	2	0,03	0,10	0,29	0,68	0,99	0,87	0,71	0,44
25	25	ЭЗ-100	3	0,03	0,10	0,29	0,67	0,98	0,92	0,80	0,61
25	50	—	—	0,03	0,09	0,28	0,6	0,89	0,93	0,97	0,99
25	50	ТСТ-6	1	0,04	0,12	0,36	0,8	0,99	0,84	0,71	0,36
25	50	ТСТ-6	2	0,04	0,12	0,36	0,76	0,99	0,87	0,85	0,57
25	50	ТСТ-6	3	0,04	0,12	0,35	0,74	0,99	0,88	0,78	0,79
25	50	ЭЗ-100	1	0,04	0,14	0,41	0,84	0,99	0,80	0,56	0,29
25	50	ЭЗ-100	2	0,04	0,14	0,4	0,81	0,99	0,82	0,70	0,43
25	50	ЭЗ-100	3	0,04	0,14	0,4	0,8	0,99	0,85	0,81	0,6
25	100	—	—	0,04	0,15	0,38	0,76	0,94	0,86	0,96	0,99
25	100	ТСТ-6	1	0,06	0,21	0,52	0,91	0,86	0,99	0,69	0,35
25	100	ТСТ-6	2	0,06	0,21	0,5	0,89	0,88	0,99	0,85	0,56
25	100	ТСТ-6	3	0,06	0,21	0,5	0,87	0,89	0,97	0,96	0,79
25	100	ЭЗ-100	1	0,07	0,24	0,58	0,94	0,83	0,95	0,84	0,28
25	100	ЭЗ-100	2	0,07	0,24	0,56	0,93	0,85	0,98	0,7	0,42
25	100	ЭЗ-100	3	0,07	0,24	0,55	0,92	0,86	0,99	0,85	0,6
25	250	—	—	0,09	0,31	0,71	0,89	0,86	0,94	0,98	0,99
25	250	ТСТ-6	1	0,14	0,42	0,84	0,91	0,98	0,94	0,69	0,35
25	250	ТСТ-6	2	0,14	0,42	0,83	0,90	0,96	0,98	0,83	0,56
25	250	ТСТ-6	3	0,14	0,42	0,83	0,90	0,95	0,99	0,92	0,79
25	250	ЭЗ-100	1	0,17	0,48	0,89	0,90	0,98	0,86	0,57	0,28
25	250	ЭЗ-100	2	0,17	0,48	0,88	0,90	0,97	0,93	0,69	0,42
25	250	ЭЗ-100	3	0,17	0,48	0,87	0,89	0,96	0,96	0,79	0,60
25	500	—	—	0,23	0,62	0,91	0,68	0,89	0,78	0,98	0,99
25	500	ТСТ-6	1	0,33	0,76	0,94	0,79	0,98	0,94	0,69	0,35
25	500	ТСТ-6	2	0,33	0,76	0,93	0,77	0,97	0,90	0,83	0,56
25	500	ТСТ-6	3	0,33	0,76	0,93	0,76	0,96	0,86	0,92	0,79
25	500	ЭЗ-100	1	0,39	0,81	0,93	0,83	0,97	0,91	0,57	0,28
25	500	ЭЗ-100	2	0,39	0,81	0,93	0,81	0,97	0,90	0,69	0,42
25	500	ЭЗ-100	3	0,39	0,81	0,93	0,8	0,96	0,89	0,79	0,60
25	1000	—	—	0,54	0,91	0,79	0,82	0,64	0,89	0,99	0,99
25	1000	ТСТ-6	1	0,69	0,98	0,87	0,87	0,61	0,84	0,69	0,35
25	1000	ТСТ-6	2	0,69	0,98	0,86	0,85	0,62	0,85	0,83	0,56
25	1000	ТСТ-6	3	0,69	0,99	0,85	0,84	0,62	0,85	0,92	0,79
25	1000	ЭЗ-100	1	0,75	0,99	0,89	0,87	0,60	0,78	0,57	0,28
25	1000	ЭЗ-100	2	0,75	0,99	0,88	0,86	0,60	0,80	0,69	0,42
25	1000	ЭЗ-100	3	0,75	0,99	0,87	0,85	0,60	0,82	0,79	0,60
50	0	—	—	0,05	0,15	0,4	0,75	0,96	0,98	0,99	0,99
50	0	ТСТ-6	1	0,06	0,18	0,46	0,84	0,98	0,92	0,73	0,36
50	0	ТСТ-6	2	0,06	0,18	0,46	0,82	0,98	0,96	0,87	0,57
50	0	ТСТ-6	3	0,06	0,18	0,45	0,81	0,97	0,97	0,95	0,8
50	0	ЭЗ-100	1	0,07	0,19	0,5	0,86	0,96	0,85	0,59	0,29
50	0	ЭЗ-100	2	0,07	0,19	0,49	0,85	0,96	0,89	0,72	0,43
50	0	ЭЗ-100	3	0,07	0,19	0,49	0,83	0,96	0,92	0,82	0,50

Продолжение прил. 4

Толщина слоя, мм	Глубина воздушного зазора, мм	Марка ткани (табл. 4)	Перфорированный экран (табл. 5)	Диффузный коэффициент звукопоглощения на частотах, Гц							
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
50	25	—	—	0,06	0,19	0,5	0,85	0,97	0,98	0,99	0,99
50	25	ТСТ-6	1	0,08	0,23	0,57	0,91	0,98	0,94	0,73	0,36
50	25	ТСТ-6	2	0,08	0,23	0,56	0,90	0,98	0,96	0,86	0,57
50	25	ТСТ-6	3	0,08	0,23	0,55	0,88	0,97	0,97	0,95	0,8
50	25	ЭЗ-100	1	0,08	0,25	0,6	0,92	0,94	0,86	0,59	0,29
50	25	ЭЗ-100	2	0,08	0,25	0,6	0,9	0,94	0,91	0,72	0,43
50	25	ЭЗ-100	3	0,08	0,25	0,59	0,9	0,94	0,93	0,82	0,6
50	50	—	—	0,07	0,24	0,59	0,91	0,92	0,95	0,99	0,99
50	50	ТСТ-6	1	0,09	0,28	0,66	0,94	0,91	0,95	0,73	0,36
50	50	ТСТ-6	2	0,09	0,28	0,65	0,93	0,91	0,96	0,86	0,57
50	50	ТСТ-6	3	0,09	0,28	0,65	0,92	0,9	0,95	0,95	0,8
50	50	ЭЗ-100	1	0,1	0,31	0,69	0,93	0,88	0,88	0,59	0,29
50	50	ЭЗ-100	2	0,1	0,31	0,68	0,93	0,88	0,92	0,72	0,43
50	50	ЭЗ-100	3	0,1	0,31	0,68	0,92	0,88	0,94	0,82	0,60
50	100	—	—	0,11	0,35	0,7	0,93	0,87	0,97	0,99	0,99
50	100	ТСТ-6	1	0,14	0,41	0,73	0,9	0,87	0,92	0,73	0,36
50	100	ТСТ-6	2	0,14	0,41	0,72	0,9	0,86	0,94	0,86	0,57
50	100	ТСТ-6	3	0,14	0,41	0,71	0,9	0,85	0,95	0,95	0,8
50	100	ЭЗ-100	1	0,15	0,44	0,81	0,88	0,85	0,85	0,59	0,29
50	100	ЭЗ-100	2	0,15	0,44	0,80	0,88	0,85	0,88	0,72	0,43
50	100	ЭЗ-100	3	0,15	0,44	0,8	0,88	0,84	0,91	0,82	0,6
100	0	—	—	0,16	0,44	0,78	0,91	0,94	0,98	0,99	0,99
100	0	ТСТ-6	1	0,18	0,48	0,8	0,91	0,95	0,94	0,73	0,36
100	0	ТСТ-6	2	0,18	0,48	0,8	0,9	0,94	0,96	0,87	0,57
100	0	ТСТ-6	3	0,18	0,48	0,79	0,9	0,94	0,97	0,95	0,8
100	0	ЭЗ-100	1	0,2	0,5	0,81	0,89	0,92	0,86	0,59	0,29
100	0	ЭЗ-100	2	0,2	0,5	0,8	0,89	0,92	0,91	0,72	0,43
100	0	ЭЗ-100	3	0,2	0,5	0,79	0,88	0,92	0,93	0,82	0,6

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
1. **Акустические характеристики звукопоглощающих покрытий** . 4
2. **Расчт и проектирование звукопоглощающих конструкций** . 6
Расчет импеданса слоя звукопоглощающего материала конечной толщины 6
Расчет импеданса защитного покрытия (ткани, пленки, перфорированного экрана) 14
Расчет диффузного коэффициента звукопоглощения плоской акустической облицовки 20
3. **Требования к акустическим характеристикам звукопоглощающих конструкций. Выбор оптимальных параметров, обеспечивающих заданный коэффициент звукопоглощения** . . . 21
4. **Условия равноценной замены звукопоглощающих материалов и защитных конструкций** 26
Приложение 1. Номограммы для определения структурных характеристик пористых и волокнистых звукопоглощающих материалов 28
Приложение 2. Программа расчета импеданса и коэффициента звукопоглощения слоя материала без защитного покрытия . . 30
Приложение 3. Номограммы для определения импеданса и коэффициента звукопоглощения слоя волокнистого материала, расположенного на относе от жесткого основания 32
Приложение 4. Частотные зависимости диффузного коэффициента звукопоглощения различных акустических облицовок . . . 44

НИИСФ Госстроя СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ ОБЛИЦОВОК

Редакция инструктивно-нормативной литературы

Зав. редакцией Л. Г. Бальян
Редактор Л. Н. Кузьмина
Мл. редактор М. Б. Быканова
Технические редакторы М. В. Павлова, Ю. Л. Циханкова
Корректор Е. Б. Тотмина

Н/К

Сдано в набор 28.07.83 Подписано в печать 12.12.83 Формат 84×108 1/32
Бумага тип. № 2 Гарнитура «Литературная» Печать высокая
Усл. печ. л. 2,94 Усл. кр.-отт. 3,15 Уч.-изд. л. 3,21 Тираж 20 000 экз.
Изд. № XII—9957 Заказ 833 Цена 15 коп.

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а

Московская типография № 32 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
103051, Москва, Цветной бульвар, 26.

gost.e-ecolog.ru