

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

**Федеральное государственное образовательное бюджетное
учреждение высшего профессионального образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»**

Ю. А. Ковалгин, О. А. Свиньина, А. А. Фадеев

РАСЧЕТ АППАРАТНО-СТУДИЙНОГО КОМПЛЕКСА ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИЯ И АУДИОТЕХНИКИ

**Часть 1. Расчет акустического оформления
студий, театров и концертных залов**

**Методические указания
по курсовому проектированию**

СПбГУТ)))

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2013**

УДК 621.396.7 (077)

ББК 32.884.8 я 73

К56

Рецензент

кандидат технических наук, доцент,

профессор кафедры телевидения и видеотехники СПбГУТ *О. В. Украинский*

Рекомендовано к печати

редакционно-издательским советом СПбГУТ

Ковалгин, Ю. А.

К56 Расчет аппаратно-студийного комплекса телерадиовещания и аудиотехники : Часть 1. Расчет акустического оформления студий, театров и концертных залов : методические указания по курсовому проектированию / Ю. А. Ковалгин, О. А. Свиньина, А. А. Фадеев. – СПб. : Издательство СПбГУТ, 2013. – 71 с.

Учебное пособие посвящено рассмотрению методов расчета, связанных с обеспечением оптимальных акустических условий в помещениях аппаратно-студийных комплексов телерадиовещания, театрах и концертных залах. Приводятся справочные данные о типах и свойствах звукопоглощающих материалов, применяемых при акустической обработке помещений. Рассматривается компьютерное моделирование и анализ результатов акустического расчета обрабатываемого помещения.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и 210400 «Радиотехника».

УДК 621.396.(077)

ББК 32.884.8 я 73

© Ковалгин Ю. А., Свиньина О. А., Фадеев А. А., 2013

© Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.	3
1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ СТУДИЙНОГО КОМПЛЕКСА.	4
1.1. Виды помещений и их основные параметры.	–
1.2. Варианты заданий.	5
1.3. Определение времени стандартной реверберации.	8
1.4. Основной фонд звукопоглощения.	9
1.5. Специальные звукопоглощающие материалы и конструкции.	11
2. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ПОМЕЩЕНИЙ СТУДИЙНОГО КОМПЛЕКСА.	34
3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИ ОБРАБАТЫВАЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ.	42
4. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПОМЕЩЕНИЯ.	43
4.1. Расчет требуемой частотной характеристики времени стандарт- ной реверберации помещения.	–
4.2. Расчет звукопоглощения, вносимого основным фондом.	45
4.3. Расчет звукопоглощения, вносимого специальными материала- ми и конструкциями.	–
4.4. Расчет времени стандартной реверберации.	49
4.5. Расчет звукоизоляции студийного помещения.	51
4.6. Построение и анализ трехмерной модели студийного помеще- ния.	54
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.	57
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.	58
Приложение 1. Программная среда Ulysses.	59
Приложение 2. Построение модели помещения.	60
Приложение 3. Расчет времени стандартной реверберации.	69

ПРЕДИСЛОВИЕ

В предлагаемом пособии рассматриваются методы расчета помещений аппаратно-студийного комплекса телерадиовещания, театров и концертных залов на оптимальные или требуемые акустические условия.

При составлении данного пособия преследовались следующие основные цели:

– отобразить методы акустических расчетов, связанных с обеспечением требуемого времени и частотной зависимости стандартной реверберации, а также допустимого уровня акустических помех в студиях и студийных аппаратных;

– привести наиболее обширные сведения о типах и свойствах звукопоглощающих материалов, применяемых при акустической обработке помещений;

– рассмотреть процесс компьютерного моделирования акустически обрабатываемого помещения на базе программной среды **Ulysses**;

– рассмотреть процесс расчета частотной зависимости стандартной реверберации на базе программной среды **Ulysses**.

Расчет проиллюстрирован приведенным в конце числовым примером.

В конце пособия приводится перечень литературы, которая может служить вспомогательным материалом при выполнении курсового проекта.

Данное пособие содержит материалы, необходимые для выполнения следующих заданий:

1) Подбор звукопоглощающих материалов для обеспечения требуемой длительности и частотной зависимости стандартной реверберации в помещениях студийного комплекса;

2) Построение модели акустически обрабатываемого помещения и размещение в нем выбранных звукопоглощающих материалов с помощью программной среды **Ulysses**;

3) Программный расчет времени стандартной реверберации в полученном студийном помещении.

4) Проектирование планировки помещений студийного комплекса и вычисление уровня акустических помех в любом из этих помещений;

Вариант задания выбирается по двум последним цифрам номера зачетной книжки, как указано в таблице выбора вариантов заданий.

№ типа студии в таблице 1	Две последние цифры № зачетной книжки			
	1	01	30	59
2	02	31	60	89
3	03	32	61	90
4	04	33	62	91
5	05	34	63	92
6	06	35	64	93
7	07	36	65	94
8	08	37	66	95
9	09	38	67	96
10	10	39	68	97
11	11	40	69	98
12	12	41	70	99
13	13	42	71	00
14	14	43	72	
15	15	44	73	
16	16	45	74	
17	17	46	75	
18	18	47	76	
19	19	48	77	
20	20	49	78	
21	21	50	79	
22	22	51	80	
23	23	52	81	
24	24	53	82	
25	25	54	83	
26	26	55	84	
27	27	56	85	
28	28	57	86	
29	29	58	87	

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ СТУДИЙНОГО КОМПЛЕКСА

1.1. Виды помещений и их основные параметры

В таблице 1 перечислены типовые телевизионные (№1...№9) и радиовещательные (№1...№17) студии и другие помещения, входящие в студийные комплексы. В таблице указаны: l , b и h – соответственно длина, ширина и высота помещений. N – число исполнителей (оптимальное и максимально допустимое), T – стандартная реверберация, $\pm\Delta T$ – допустимые пределы отклонения времени реверберации от оптимальной величины. В графе $T = \varphi(F)$ даны сведения о требуемых частотных характеристиках реверберации, причем во всех помещениях, начиная с частоты 250 Гц, время оптимальной реверберации не должно зависеть от частоты (в пределах

упомянутых допусков), а на частоте 125 Гц рекомендуется уменьшение (знак «-») или увеличение (знак «+») реверберации на указанную в данной графе величину, выраженную в процентах по отношению к оптимальной на частотах от 250 Гц и выше.

1.2. Варианты заданий

Акустический расчет перечисленных помещений заключается в:

а) подборе числа единиц звукопоглощения, обеспечивающих требуемую длительность реверберации (расчет на реверберацию) и

б) определении уровня акустических помех за счет проникновения звуковой энергии из соседних помещений, а также по вентиляционным каналам и корпусу здания (расчет на звукоизоляцию).

Расчет ведется при частотах звуковых колебаний 125, 250, 500, 1000, 2000 и 4000 Гц. Последнее, указанное в табл. 1 помещение (№29), принято называть «эхо-камерой», хотя технически более правильным следует считать термин «реверберационное помещение». Акустические процессы, протекающие в этом помещении, не должны создавать эффект повторения звука типа эха. Данное помещение предназначено для обеспечения возможности замедленного затухания плотности звуковой энергии, т.е. увеличения длительности реверберационного процесса. Известно, что оптимальная реверберация в значительной мере зависит от рода исполняемого музыкального произведения, а в ряде случаев способствует созданию так называемой «акустической декорации» при литературно-драматических передачах.

Увеличение длительности реверберации создает у слушателя впечатление большого помещения (танцевальный зал, заводской цех и т. п.). Такие эффекты улучшают эмоциональное восприятие передаваемой программы, обеспечивая звукорежиссеру возможность увеличения реверберации по сравнению с имеющейся в студии. Реверберационный процесс, создаваемый в данном помещении, подмешивается к сигналу вещательной передачи, воспринимаемому расположенными в студии микрофонами.

Заметим, что громкоговоритель устанавливается так, чтобы на микрофон действовали только звуковые волны, отраженные от стен эхо-комнаты. Система фильтров позволяет добавлять реверберационный эффект на различных частотах, т.е. изменять частотную характеристику реверберации. Смесительное устройство позволяет звукорежиссеру «подмешивать» реверберирующий сигнал в любых соотношениях с уровнем основного сигнала.

Эхо-комнаты применяются как в домах радио, так и в телевизионных центрах. Если эхо-комната имеет прямоугольную форму, то ее размеры обычно выбираются из соотношения:

$$l \cong 1,62\sqrt[3]{V}, \quad b = \sqrt[3]{V}, \quad h \cong 0,62\sqrt[3]{V},$$

где V – объем помещения.

Таблица 1

Типовые телевизионные и радиовещательные студии

№	Наименование	l, м	b, м	h, м	N		T, с	ΔT , с	T= $\varphi(F)$	Примечание
					опт	макс				
1	Большая телевизионная студия для литературно-драматических и музыкальных передач при сложном декорационном оформлении	40	25	14	–	–	1,1	$\pm 0,2$	–20%	При расчете принимается N = 50 чел.
2		30	20	12,5	–	–	1,0	$\pm 0,2$	–20%	то же
3	Средняя телевизионная студия для литературно-драматических и музыкальных передач с декорационным оформлением	20	15	8,5	–	–	0,9	$\pm 0,1$	–20%	то же
4	Малая телевизионная студия для литературно-драматических и научно-познавательных передач с декорационным оформлением и демонстрацией макетов, моделей и др. Наглядных пособий	15	10	6,0	–	–	0,8	$\pm 0,1$	–20%	При расчете принимается N = 25 чел.
5	Дикторская телестудия с показом диктора	10	8	4,5	2	4	0,6	$\pm 0,1$	–20%	
6	Кабина переводов	4	2,5...2,7	2,6...2,8	1	1	0,4	–0,1	то же	
7	Кабина комментаторов телевизионных передач	4	2,5...2,7	2,6...2,8	1	1	0,4	–0,1	то же	
8	Аппаратные звукорежиссеров	$l \cdot b = 35 \dots 45 \text{ м}^2$		3,5			0,4...0,5	+0,05	то же	
9	Кинопросмотровые залы	$l \cdot b = 60 \dots 80 \text{ м}^2$		4,0			0,6...0,7	+0,05	то же	
10	Большая концертная радиовещательная студия для передачи крупных симфонических произведений с возможным присутствием до 280 слушателей	40	25	14	250	500	2,0	$\pm 0,2$	+25%	250 исполнителей и 250 слушателей

Продолжение табл. 1

№	Наименование	l , м	b , м	h , м	N		T , с	ΔT , с	$T=\varphi(F)$	Примечание
					опт	макс				
11	Средняя музыкальная студия для симфонического оркестра	26,5	17	10	40	65	1,7	$\pm 0,2$	-10%	
12		24	14,5	8,5	40	65	1,5	$\pm 0,2$		
13	Малая музыкальная студия для небольших оркестров	20	15	8,3	30	35	1,2	$\pm 0,2$	-10%	
14		20	12,5	8	30	35	1,2	$\pm 0,2$		
15	Камерная студия для солистов и оркестра малого состава	14	8,5	5,0	10	15	1,0	$\pm 0,15$	0	
16		15	10	6,0	10	15	1,0	$\pm 0,15$	0	
17	Студия эстрадной музыки	24	14,5	10...8.5	35	60	1,0	$\pm 0,2$	0	
18	Большая студия для литературно-драматических передач	18	11	6,0	20	30	0,8	$\pm 0,1$	-30%	
19		15	10	5,4	20	30	0,8	$\pm 0,1$	-30%	
20	Средняя студия для литературно-драматических передач	12,5	8	5,0	10	15	0,6	$\pm 0,1$	-30%	
21	Речевая студия	6	5	4,0	2	4	0,4	+0,1	-25%	
22		5,8	4,5	3,45	2	4	0,4	+0,1	-25%	
23	Заглушённая студия	8	6,25	4,0	6	10	0,2	-	-	
24	Разглушенная студия	10	7,5	4,0	6	10	-	-	-	
25	Радиовещательные (студийные) аппаратные, аппаратные магнитофонные, помещения техконтроля, аппаратные монтажа фонограмм	$l \cdot b = 35\text{м}^2$		3,5	-	-	0,4...0,5	$\pm 0,05$	0	
26	Аппаратные многоканальных систем пространственного звучания (непрямоугольной формы)	$l \cdot b = 70...130\text{м}^2$		4,0...6,0	-	-	0,3	$\pm 0,1$	-25%	
		$l \cdot b \cdot h \geq 120...200\text{м}^3$ $h : b : l =$ $= 1 : 1,59(\pm 0,7) : 2,52(\pm 0,28)$								
27	Кабины радиокomentаторов	$l \cdot b = 10...12\text{м}^2$		2,8...3,0	1	1	0,4	$\pm 0,1$	0	
28	Репетиционные	$l \cdot b = 60...120\text{м}^2$		4...5	-	-	0,6...0,8	$\pm 0,05$	0	
29	Эхо-камеры (реверберационные)	$l \cdot b \cdot h = 120...200\text{м}^3$			-	-	до 5,0		0	

При этом на стенах и потолке делаются жесткие, хорошо отражающие, клинообразные и пирамидальные выступы, способствующие рассеянию отраженной звуковой энергии. Высота клиньев берется примерно 0,5м, что увеличивает стоимость строительства. Без клиньев эхо-комнате придают неправильную форму. Поверхности комнаты обрабатываются наиболее отражающими материалами (например, бетон). Метод и формулы для акустического расчета эхо-комнаты и любых других помещений, перечисленных в табл. 1, аналогичны.

В данном пособии рассматриваются только методы акустических расчетов помещений студийного комплекса, поэтому сведения об электрических способах создания искусственной реверберации (пластинчатые, магнитные, цифровые ревербераторы) здесь не приводятся.

1.3. Определение времени стандартной реверберации

Из известной формулы Эйринга следует, что время стандартной реверберации T :

$$T = \frac{0,161 \cdot V}{4 \cdot \mu \cdot V - S \cdot \lg(1 - \alpha_{\text{cp}})} = \frac{0,07 \cdot V}{0,04 \cdot \delta \cdot V - S \cdot \lg(1 - \alpha_{\text{cp}})} \quad (1)$$

где $\delta = \mu/0,23$ – коэффициент затухания звуковой энергии в воздухе, выраженный в дБ на метр; V – объем помещения в м³; S – площадь всех поверхностей помещения (стен, пола и потолка); α_{cp} – средний коэффициент звукопоглощения равный A/S , где A – общее звукопоглощение. Из (1) получим, что

$$\lg(1 - \alpha_{\text{cp}}) = \frac{0,04 \cdot \delta \cdot V}{S} - \frac{0,07 \cdot V}{S \cdot T} = 0,4 \cdot \frac{V}{S} \cdot \left(\delta - \frac{0,175}{T} \right) \quad (2)$$

где: $V = l \cdot b \cdot h$, $S = 2 \cdot (l \cdot b + l \cdot h + b \cdot h)$ – при прямоугольной форме помещения.

Величина δ зависит от частоты звуковых колебаний и относительной влажности воздуха. Наиболее приятной для человека является относительная влажность от 40 до 60%. Величины δ в зависимости от относительной влажности (отложенной по оси абсцисс) и частоты графически показаны на рис. 1. Те же величины при основных расчетных частотах и относительной влажности приблизительно равной 50%, даны в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов звукопоглощения в воздухе от частоты

F , Гц	125	250	500	1000	2000	4000
δ , дБ/м	–	–	0,001	0,003	0,01	0,03

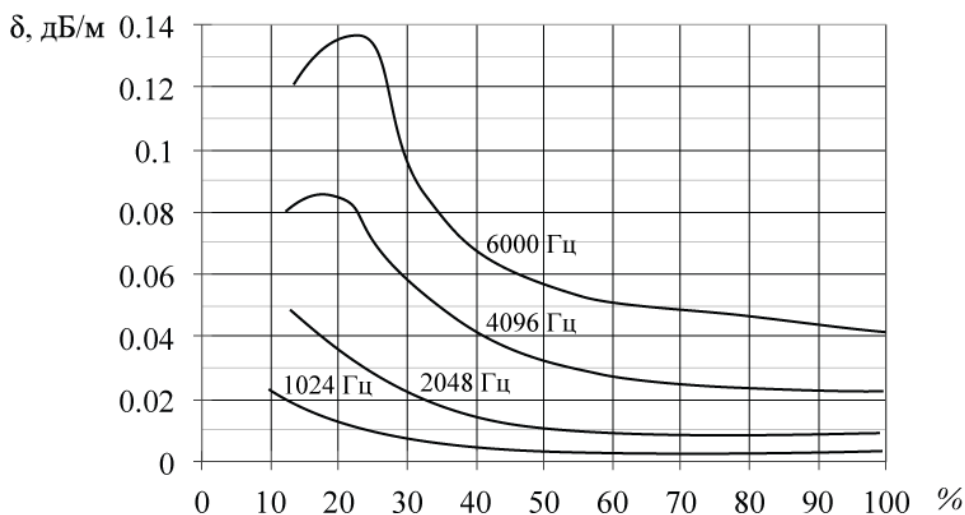


Рис. 1. Зависимость поглощения звуковой энергии в воздухе (δ) от относительной влажности воздуха (%) и частоты.

Произведя расчет на реверберацию любого помещения, указанного в табл. 1, можно по данным, приведенным в этой таблице, определить объем помещения, общую площадь поверхностей S и допустимые максимальную T_{max} и минимальную T_{min} реверберации на разных частотах. Находя по данным табл. 2 величины δ и используя формулу (2), можно определить требуемое значение $\lg(1 - \alpha_{cp})$, а затем α_{cp} и общее число единиц звукопоглощения $A = \alpha_{cp}S$.

1.4. Основной фонд звукопоглощения

При подборе звукопоглощающих материалов в первую очередь необходимо учитывать так называемый основной фонд абсорбентов. В основном фонде учитываются поглотители звуковой энергии, наличие которых необходимо для проведения передач из студии или эксплуатации любого другого помещения. Для радиовещательных студий к основному фонду относятся:

1. Исполнители, число которых определяется по табл. 1 ($N_{опт}$);
2. Студийный инвентарь (стулья, музыкальные инструменты и т. п.);
3. Ковер, площадь которого берется равной приблизительно 1/3 площади пола помещения.

Необходимость использования ковра определяется следующим. Если микрофон M (рис. 2) находится под воздействием прямого и отраженного от незаглушенного пола звука, то на частотах, при которых разность путей звуковых волн от исполнителя (I) до микрофона равна любому нечетному числу полуволн, т.е. выполняется равенство $l_2 + l_3 - l_1 = (\lambda/2) \cdot (2n + 1)$, то на соответствующих частотах возникают резкие спады частотной характеристики воспринимаемого микрофоном сигнала;

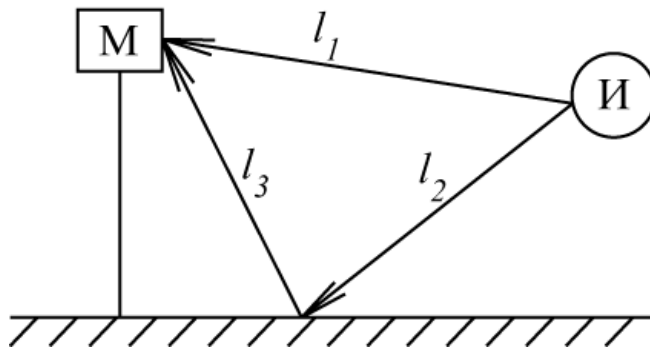


Рис. 2. Пути прямой и отраженной от пола звуковых волн (И – источник звука, М – микрофон)

4. Свободная площадь пола;
5. Окно в студию аппаратную площадью порядка 3 м^2 ;
6. Вентиляционные решетки, общая площадь S_p которых зависит от объема $V [\text{м}^3]$ студии и приблизительно равна

$$S_p \cong \frac{V}{3 \cdot 10^2};$$

7. Двери. Малые радиовещательные студии, число исполнителей в которых не превышает 10...15 человек, имеют одну дверь площадью, приблизительно равной 3 м^2 . В больших студиях делаются 2...3 двери, соответственно для выхода исполнителей, входа исполнителей и одна – для запасного выхода. В телевизионных студиях, кроме дверей предусматриваются ворота для внесения и удаления декораций. Площадь ворот порядка 9 м^2 должна обеспечивать возможность въезда автомашины.

В телевизионных студиях, из которых ведутся передачи с декорационным оформлением в основном фонде учитываются также декорации. Несмотря на большое разнообразие в декорационном оформлении проведенные измерения показали, что коэффициент звукопоглощения декораций мало изменяется в зависимости от их вида. Площадь каждой декорации в среднем составляет $50...60 \text{ м}^2$.

Напомним, что поглощательная способность материалов, занимающих определенную площадь, оценивается коэффициентом звукопоглощения α_n . Абсорбенты, площадь которых определить нельзя (исполнители, музыкальные инструменты и т.п.), оцениваются единицами звукопоглощения A_n . Общее число единиц звукопоглощения основного фонда:

$$A_0 = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + A_1 n_1 + A_2 n_2 + \dots,$$

где S_n – площадь; n_n – число абсорбентов.

Коэффициенты и единицы звукопоглощения типовых абсорбентов основного фонда даны в табл. 3.

Таблица 3

Звукопоглощение абсорбентов основного фонда

F, Гц			125	250	500	1000	2000	4000	8000
Абсорбент	№								
Человек	–	A	0,28	0,40	0,45	0,49	0,47	0,45	0,45
Студийный инвентарь	–	A	0,23	0,26	0,26	0,29	0,32	0,36	0,36
Ковер с ворсом толщиной ¼ дюйма, приклеенный к полу	101	α	0,05	0,05	0,15	0,30	0,50	0,55	0,25
Ковер плотный, с латексной подкладкой, на пенорезине	111	α	0,08	0,27	0,39	0,34	0,48	0,63	0,37
Ковер плотный, на фетровой подложке	113	α	0,08	0,24	0,57	0,69	0,71	0,73	0,55
Ковер (для помещений/уличный)	114	α	0,01	0,02	0,06	0,15	0,25	0,45	0,12
Линолеум, на бетонном полу	208	α	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03
Пол из сосновых досок толщиной ¾ дюйма	210	α	0,09	0,08	0,08	0,09	0,10	0,10	0,09
Деревянный пол на балках	229	α	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,09
Деревянный паркет	232	α	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06
Окно	16	α	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,16
Вентиляционные решетки	438	α	0,30	0,40	0,50	0,50	0,50	0,40	0,48
Дверь, монолитная деревянная	10	α	0,10	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05
Декорации	–	α	0,73	0,59	0,75	0,71	0,76	0,70	0,86

1.5. Специальные звукопоглощающие материалы и конструкции

Наиболее трудной задачей, является подбор специальных звукопоглощающих материалов для акустической обработки стен и потолка студий.

Для дополнительной акустической обработки радиовещательных, телевизионных студий и других помещений, перечисленных в табл. 1, применяются специальные материалы, к числу которых относятся пористые, а также плоские или выпуклые резонансные поглотители.

Поглощение звуковой энергии пористыми материалами обусловлено трением колеблющихся частиц воздуха падающей звуковой волны о стенки пор и переходом звуковой энергии в тепловую.

Пористые поглотители имеют вид жестких и мягких плит.

Жесткие древесноволокнистые плиты, фибролит, плиты акустические декоративные ПАД, плиты акустические с отверстиями ПАО (отверстия в виде круглых перфораций), плиты акустические стандартные ПАС, плиты «Акмигран», плиты «Брекчия» и т.п. окрашиваются анилиновыми красителями в любой цвет, имеют достаточно ровную поверхность и не требуют дополнительного декоративного оформления.

Плиты 1 из более мягкого материала (рис. 3, а) крепятся в каркасе из деревянных реек 2; сверху покрываются акустически прозрачной материей

3 и декоративной решеткой из тонких реек 4. К числу таких поглотителей относятся плиты из минеральной ваты и плиты «Стилит».

Резонансные поглотители имеют упругий лист из фанеры или дюралюминия. Падающая звуковая волна вызывает колебания листа, а возникающее при этом внутреннее трение – переход звуковой энергии в тепловую. Между листом и неподвижной стеной может быть воздушный промежуток или слой пористого вещества, демпфирующего резонансные колебания листа и, как правило, обеспечивающего звукопоглощение в достаточно широком спектре частот.

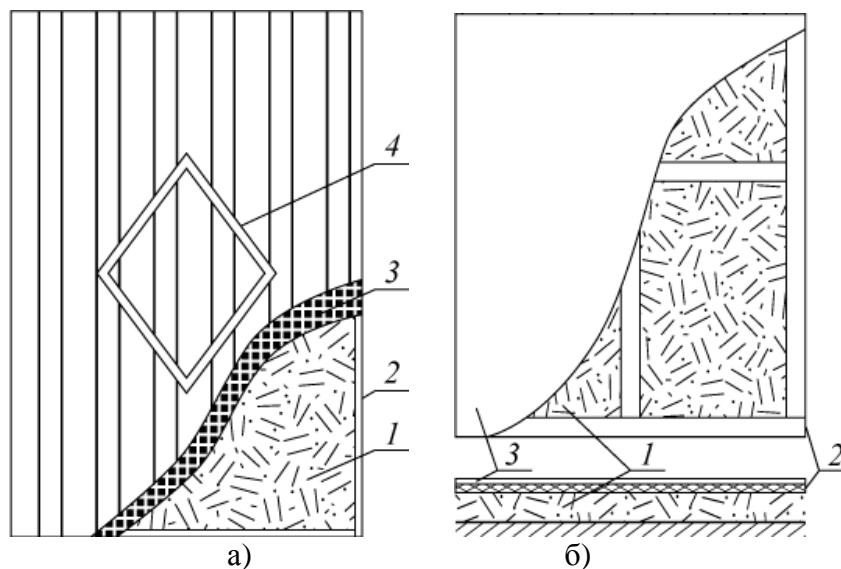


Рис. 3. Панельные звукопоглощающие конструкции:
 а – конструкция акустической плиты с мягким звукопоглотителем;
 б – конструкция плоского резонансного абсорбента.

Лист 1 крепится на каркасе из реек 2 (рис. 3, б). В качестве пористого заполнителя 3 обычно используется материал типа «Стилит». Наибольшее применение получили панели из фанеры, древесно-стружечных плит, которые оклеиваются пластиком, панели из декоративного пластика, дюралюминиевые тонкие плиты «Ацеид», гипсовые панели, иногда обтягиваемые тканью.

Особой разновидностью являются панели (рис. 4, а), имеющие различную длину l , ширину b и высоту h , открытый или закрытый торец C и применяемые с пористым заполнителем или без него.

Выпуклые резонансные поглотители, называемые полицилиндрическими, (рис. 4, б), рассеивают часть звуковой энергии.

Внешняя поверхность конструкции сделана из фанеры 1, которая крепится к кружалам 2 с прокладками 3 из войлока или резины. Основой конструкции является рама 4. Различные расстояния между кружалами позволяют создавать резонаторы разных объемов, которые настроены на ряд частот звукового спектра.

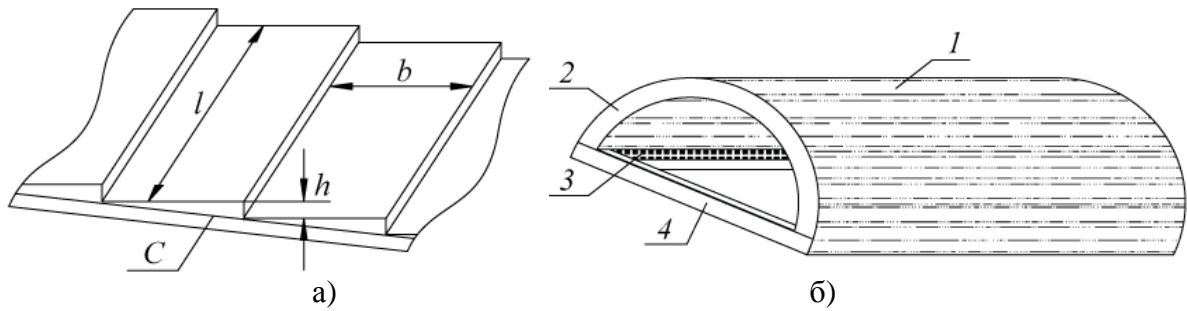


Рис. 4. Резонансные поглотители:
а – разновидность панели; б – полицилиндрическая конструкция.

Применяются также полицилиндры с пористым поглотителем – демпфером 2 (рис. 5, а). Покровный лист 3 крепится на каркасе 1 с воздушным промежутком.

Резонансные поглотители (рис. 5, б) могут иметь покровный лист 1 с перфорационными отверстиями 2. С внутренней стороны перфорированный лист оклеивается материей 3. Воздушный промежуток 4 между листом и стеной иногда заполняется пористым звукопоглотителем.

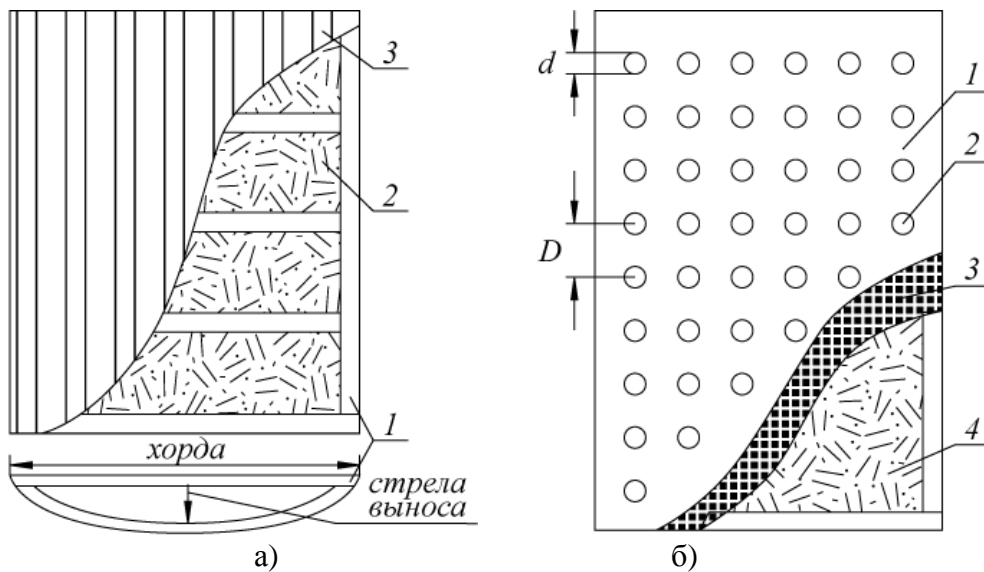


Рис. 5. Резонансные поглотители:
а – полицилиндрическая конструкция с пористым поглотителем;
б – перфорированный лист с подклеенной тканью.

Величины диаметров отверстий d , шага перфораций D и отношения площади перфораций к площади всего листа K обеспечивают различную частотную зависимость коэффициентов звукопоглощения при прочих равных условиях.

Применяются частично перфорированные конструкции с асбоцементным покровным листом. В зависимости от того, какая часть листа перфо-

рирована, от шага и диаметра перфораций, различают десять типов конструкций. Примеры конструкций III-го и VIII-го типов даны на рис. 6, а.

Поверхность резонансных поглотителей окрашивается, в любой цвет.

При подборе звукопоглощающих материалов следует применять поглотители разных частот, чередуя их при креплении на стенах и потолке акустически обрабатываемого помещения. На противоположных стенах рекомендуется применять различную последовательность расположения поглотителей, чтобы избежать встречного отражения волн с одинаковыми частотами и возможности образования стоячих звуковых волн.

Сведения о специальных звукопоглощающих материалах и конструкциях приводятся в табл. 4, 5 и 6, при составлении которых каждый отдельный вид абсорбента снабжен порядковым номером.

Перечислим порядковые номера видов поглотителей. Длина, ширина и толщина плоских плит обозначены соответственно: l (м), b (м) и h (мм). Плоские плиты могут крепиться на некотором расстоянии от неподвижной стены. Воздушный зазор между плитой и стеной a_1 (мм), толщина зазора, заполненного пористым поглотителем – a_2 (мм). В ряде случаев имеется как воздушный, так и заполненный пористым поглотителем промежуток.

Сведения о толщине этих слоев даны в табл. 6. Выпуклые полицилиндрические конструкции характеризуются величинами хорды x , стрелы вылета h и толщиной слоя a пористого поглотителя, если таковой имеется (рис. 6, б).

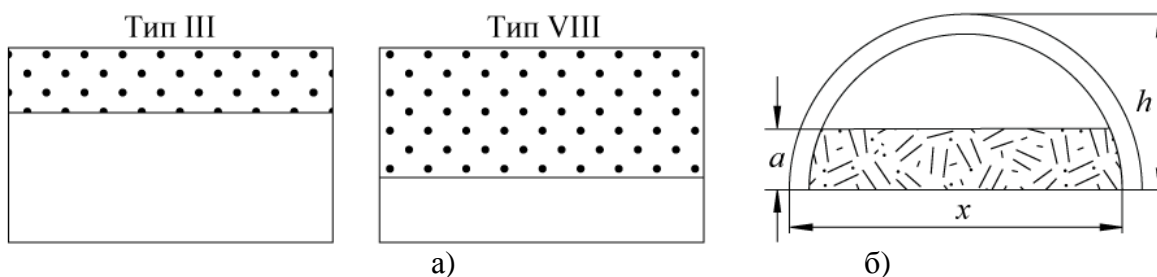


Рис. 6. Примеры перфорированных конструкций звукопоглотителей:

а – частично перфорированные поглотители;

б – основные размеры полицилиндра.

Перфорированные плиты характеризуются шагом перфораций D и диаметром d перфорационных отверстий (рис. 5, б).

Ряд поглотителей имеет щелевые перфорации. В данном случае указываются размеры p , q и площадь Q отверстий (рис. 7). Для перфорированных листов указан коэффициент перфораций K , т.е. отношение площади отверстий к площади всего перфорированного листа.

В рамках курсового проекта для выполнения расчета звукопоглощения используются материалы, имеющиеся в базе данных программной среды **Ulysses**. Это обеспечивает возможность последующего создания и анализа

трехмерной модели акустически обработанного помещения. С целью упрощения подбора звукопоглощающих материалов и конструкций, для выполнения курсового проекта используется около 200 наименований поглотителей, однако, при необходимости можно дополнительно использовать

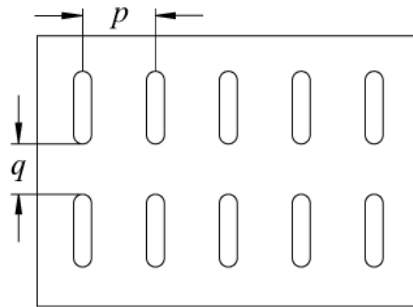


Рис. 7. Щелевая перфорация.

любой материал, имеющийся в полной базе данных программы **Ulysses**. Подробная информация о работе с программой и базой данных звукопоглощающих материалов изложена в прил. 2.

Информация об используемых для выполнения расчета поглотителях представлена в таблицах 4–9.

В табл. 4 приведен перечень абсорбентов, данные о составе, размерах и специальных характеристиках.

В табл. 5 приводятся данные воздушных зазоров (a_1 , мм) и слоев пористого заполнителя (a_2 , мм). Знак «0» означает, что плита крепится вплотную к стене.

В табл. 6 приведены данные коэффициентов звукопоглощения специальных акустических материалов, приведенных в перечне абсорбентов в табл. 4. в указанной последовательности, т.е. по типу конструкции и материалу панелей.

В табл. 7 представлены данные α_{\max} для подбора специальных абсорбентов. Материалы перечислены по особенностям частотных зависимостей коэффициентов звукопоглощения. Здесь указаны коэффициенты звукопоглощения α_{\max} , частоты, которым соответствуют эти величины и номера поглотителей (в соответствии с табл. 6). Как видно из табл. 7, большинство специальных абсорбентов относятся к числу низкочастотных поглотителей, а количество высокочастотных поглотителей значительно меньше. Табл. 7 помогает выбрать требуемый поглотитель при выполнении расчета.

В табл. 7 приведены также систематизированные по частотным свойствам коэффициенты звукопоглощения α специальных акустических материалов, приведенные к максимальному значению α_{\max} для отдельного материала. Очевидно, что $\alpha / \alpha_{\max} = (\alpha \cdot S) / (\alpha_{\max} \cdot S) = A / A_{\max}$, т.е. данные табл. 8 позволяют легко подобрать требуемую частотную зависимость единиц звукопоглощения. Необходимая площадь подобранного по табл. 8 поглотителя

находится с помощью табл. 7, где указана величина α_{\max} данного поглотителя. Следовательно, $S = A/\alpha_{\max}$. Величина A_{\max} известна из расчета.

Заметим, что в табл. 8 относительные значения коэффициентов звукопоглощения перечислены в следующей последовательности для каждого акустического материала.

Вначале даны отношения α/α_{\max} абсорбентов, имеющих α_{\max} на частоте 125 Гц, затем – на частоте 250 Гц и т.д. Материалы, имеющие α_{\max} на частоте 125 Гц, расположены в последовательности, определяемой их поглотительной способностью на частоте 4000 Гц (от максимума к минимуму). По тому же признаку расположены материалы, имеющие α_{\max} на частотах 250 и 500 Гц. Материалы, которые имеют α_{\max} на частотах 1000, 2000 или 4000 Гц, расположены в последовательности, определяемой величиной α на частоте 125 Гц (от максимума к минимуму). Таким образом, преимущественно низкочастотные поглотители в табл. 8 расположены в последовательности, определяемой их поглотительной способностью на верхней расчетной частоте, высокочастотные – в последовательности, определяемой их поглотительной способностью на нижней расчетной частоте.

В ряде особых случаев необходимо применение специальных материалов, которые следует учитывать в основном фонде. Так, например, поверхности эхо-комнат обрабатываются материалами, имеющими наименьшие коэффициенты звукопоглощения (бетон, штукатурка). Для отделки нижней части стен студий и студийных аппаратных применяются панели высотой порядка 0,7...1,0 м. В телевизионных студиях применяются декоративные занавеси в качестве фона позади лектора, диктора или небольшого инструментального ансамбля. Такие обязательно необходимые абсорбенты называются дополнительными. Коэффициенты звукопоглощения этих абсорбентов даны в табл. 9.

Метод подбора специальных и дополнительных звукопоглощающих материалов для обработки поверхностей помещения будет подробно изложен в разделе 4 «Пример выполнения акустического расчета помещения». Поглотители с разными акустическими характеристиками размещают на поверхностях студии по возможности равномерно, тем самым способствуя повышению диффузности звукового поля.

В качестве примеров размещения звукопоглощающих материалов и конструкций, на рис. 8–10 представлены несколько европейской студии звукозаписи, акустическое оформление которых было выполнено английской фирмой **Munro Acoustics**.

Таблица 4

Специальные звукопоглощающие материалы и конструкции

№	Описание
500–505	Фанерные листы с герметичным воздушным зазором и поглотителем из стекловаты. $h = 1,6$ мм.
506–511	Фанерные листы с герметичным воздушным зазором и поглотителем из стекловаты. $h = 3,2$ мм.
512–517	Фанерные листы с герметичным воздушным зазором и поглотителем из стекловаты. $h = 4,7$ мм.
518–522	Фанерные листы с герметичным воздушным зазором и поглотителем из стекловаты. $h = 6,3$ мм.
523–526	Фанерные листы с герметичным воздушным зазором и поглотителем из стекловаты. $h = 7,9$ мм.
700–704	Плиты «Ацеид» (ГОСТ 4248–52), $h = 8$ мм.
705–707	Акустический фибролит, неокрашенный, плотность 300 кг/м^3 . $h = 35$ мм.
708	Акустический пенобетон, плотность 940 кг/м^3 . $h = 30$ мм.
709	Арболит перфорированный, плотность 150 кг/м^3 . $h = 25$ мм.
710	Асбестит, плотность 570 кг/м^3 . $h = 35$ мм.
711	Асбосиликат, плотность 250 кг/м^3 . $h = 35$ мм.
713–714	Гофрированная конструкция.
715	Гофрированная конструкция, закрепленная на листах ДСП толщиной 20 мм.
718	Вспененный пластик с открытым воздушным зазором.
719	Вспененный пластик с поглотителем из минеральной ваты.
720	Вспененный пластик с закрытым воздушным зазором.
721	Синтактическая пена из стекла с открытыми порами.
722	Стекловата. $h = 30$ мм.
723	Стекловата, $h = 50$ мм, с перфорированным экраном из ДВП №1 ($h = 4$ мм; $d = 3,5$ мм; $D = 15$ мм).
724	Стекловата, $h = 50$ мм, с перфорированным экраном из ДВП №2 ($h = 4$ мм; $d = 3,5$ мм; $D = 15$ мм).
725	Стекловата. $h = 90$ мм.
726	Минеральная вата. $h = 150$ мм.
727	Минеральная вата, в х/б ткани. $h = 40$ мм.
728	Минеральная вата, $h = 40$ мм, с экраном из перфорированной древесноволокнистой плиты ($h = 4$ мм; $d = 3,5$ мм; $D = 15$ мм).
729	Минеральная вата, $h = 60$ мм, с экраном из перфорированной древесноволокнистой плиты ($D = 25$ мм).
730–731	Плиты из минеральной ваты. $h = 100$ мм.
732	Плиты из минеральной ваты, два слоя. $h = 25–30$ мм.
733–734	Плиты из минеральной ваты. $h = 25–30$ мм.
735–737	Плиты из минеральной ваты. $h = 55$ мм.
738	Минеральная вата с тонким древесным волокном, плотность $6,5 \text{ кг/м}^3$. $h = 25$ мм.
739	Минеральная вата с тонким древесным волокном, плотность $6,5 \text{ кг/м}^3$, $h = 25$ мм, с перфорированным металлическим экраном ($d = 1,5$ мм; $K = 10 \text{ отв/см}^2$).
740	Минеральная вата, покрытая перфорированной акустической штукатуркой. $h = 35$ мм.

№	Описание
741–742	Плиты «Пемзолит»
743–746	Перфорированный пластик, подклеенный стеклотканью. $d = 5$ мм; $D = 35$ мм.
747–748	Перфорированный пластик с поглотителем из минеральной ваты. $d = 5$ мм; $D = 35$ мм.
749–753	Перфорированные фанерные листы с поглотителем из минеральной ваты. $h = 4$ мм; $d = 5$ мм; $D = 100$ мм.
754–759	Перфорированные фанерные листы с поглотителем из минеральной ваты. $h = 4$ мм; $d = 5$ мм; $D = 35$ мм.
760–764	Перфорированные фанерные листы с поглотителем из минеральной ваты. $h = 4$ мм; $d = 4$ мм; $D = 40$ мм.
765–769	Перфорированные фанерные листы с поглотителем из минеральной ваты. $h = 4$ мм; $d = 20$ мм; $D = 60$ мм.
770–773	Перфорированные фанерные листы с поглотителем из минеральной ваты. $h = 4$ мм; $d = 5$ мм; $D = 65$ мм.
774–775	Перфорированный пластик, подклеенный двумя слоями марли. $d = 5$ мм; $D = 35$ мм.
776–778	Перфорированный пластик, подклеенный х/б тканью и двумя слоями марли. $d = 5$ мм; $D = 35$ мм.
779–780 782–784	Перфорированный пластик с поглотителем из минеральной ваты. $d = 5$ мм; $D = 65$ мм.
781 783	Перфорированный пластик, подклеенный двумя слоями марли. $d = 5$ мм; $D = 65$ мм.
785–787	Перфорированный пластик, подклеенный х/б тканью и двумя слоями марли. $d = 5$ мм; $D = 65$ мм.
788	Фанерные листы с полицилиндрическим профилем. $h = 40$ мм; $x = 115$ мм.
789	Фанерные листы с полицилиндрическим профилем. $h = 20$ мм; $x = 50$ мм.
790	Фанерные листы с полицилиндрическим профилем с поглотителем из минеральной ваты. $h = 20$ мм; $x = 50$ мм.
791	Фанерные листы с полицилиндрическим профилем. $h = 25$ мм; $x = 70$ мм.
792	Фанерные листы с полицилиндрическим профилем с поглотителем из минеральной ваты. $h = 25$ мм; $x = 70$ мм.
793	Фанерные листы с полицилиндрическим профилем. $h = 30$ мм; $x = 90$ мм.
794	Полицилиндрическая конструкция 1–го типа. $h = 300$ мм; $x = 1000$ мм.
795	Полицилиндрическая конструкция 1–го типа с пористым наполнителем. $h = 300$ мм; $x = 1000$ мм; $a = 50$ мм.
796–797	Полицилиндрическая конструкция 2–го типа с пористым наполнителем. $h = 300$ мм; $x = 1000$ мм; $a = 50$ мм.
798 800 802	Неперфорированный пластик. $h = 2$ мм.
799 801 803	Неперфорированный пластик с поглотителем из минеральной ваты. $h = 2$ мм.
804	Древесноволокнистые плиты. $h = 12$ мм.
805	Древесноволокнистые плиты, два слоя, закрепленные на разном расстоянии от стены (0 мм и 30 мм). $h = 12$ мм.

№	Описание
806	Древесноволокнистые плиты, два слоя, закрепленные на разном расстоянии от стены (0 мм и 50 мм). $h = 12$ мм.
807	Древесноволокнистые плиты. $h = 25$ мм.
808	Древесноволокнистые плиты, два слоя. $h = 25$ мм.
809–811	Перфорированные древесноволокнистые плиты. $h = 18$ мм; $p = 15$ мм; $q = 20$ мм; $Q = 112$ мм ² .
812	Древесностружечные плиты, неокрашенные. $h = 20$ мм.
813	Шерстяной фетр. $h = 25$ мм.
900–901	Стекловолокно, необлицованное. Крепление 4; $h = 25$ мм.
902	Стекловолокно, подклеенное нетканым полотном. Крепление 4; $h = 16$ мм.
903	Стекловолокно с ковром толщиной 3 мм. Крепление 2; $h = 13$ мм.
904	Стекловолокно, подклеенное тканым полотном. Крепление 2; $h = 25$ мм.
905	Стекловолокно, подклеенное винилом. Крепление 2; $h = 25$ мм.
906	То же, но крепление 2; $h = 50$ мм.
907	То же, но крепление 4; $h = 50$ мм.
908	Стекловолокно с плитой Glastrate® толщиной 3 мм, покрытое пленкой Tedlar® толщиной 0,04 мм. Крепление 4; $h = 25$ мм.
909	То же, но $h = 50$ мм.
910	То же, но $h = 38$ мм.
911	То же, но крепление 7; $h = 25$ мм.
912	То же, но $h = 38$ мм.
913	То же, но $h = 50$ мм.
914	Стекловолокно с минеральной плитой толщиной 16 мм, покрытое пленкой Tedlar® толщиной 0,04 мм. Крепление 7; $h = 13$ мм.
915	Стекловолокно, подклеенное тканым полотном из 100% полиэстера. Крепление 4; $h = 13$ мм.
916	То же, но крепление 2.
917	То же, но крепление 7.
918	Стекловолокно, подклеенное тканым полотном из 100% полиэстера, с минеральной плитой 16 мм. Крепление 7; $h = 11$ мм.
923	Стекловолокно, подклеенное стеклотканью плотностью 112 кг/м ³ . Крепление 7; $h = 25$ мм.
924	То же, но плотность стеклоткани 240 кг/м ³ .
925	Стекловолокно, подклеенное тканым полотном из 100% полиэстера. Крепление 4; $h = 25$ мм.
926	Стекловолокно с плитой Glastrate® толщиной 3 мм, подклеенное тканым полотном из полиэстера. Крепление 4; $h = 25$ мм.
927	Стекловолокно, подклеенное тканым полотном из полиэстера, с воздушным зазором 3 мм. Крепление 4; $h = 25$ мм.
928	Стекловолокно с плитой Glastrate® толщиной 3 мм, подклеенное тканым полотном из полиэстера, воздушный зазор 3 мм. Крепление 4; $h = 25$ мм.
929	Стекловолокно, покрытое пленкой Tedlar® толщиной 0,04 мм. Крепление 2; $h = 50$ мм.
930	Стекловолокно с экраном из перфорированного винила. Крепление 4; $h = 25$ мм.
931	Стекловолокно, покрытое пленкой Tedlar® толщиной 0,04 мм. Крепление 7; $h = 25$ мм.

№	Описание
932	Стекловолокно с плитой Glastrate® толщиной 3 мм, с экраном из микроперфорированного винила. Крепление 2; $h = 25$ мм.
933	Стекловолокно с экраном из микроперфорированного винила. Крепление 2; $h = 25$ мм.
934	Перфорированная минеральная плита с экраном из микроперфорированного винила. Крепление 2; $h = 19$ мм.
935	Стекловолокно, подклеенное тканым полотном из полиэстера. Крепление 7; $h = 19$ мм.
936	Стекловолокно, покрытое пленкой Tedlar® толщиной 0,04 мм. Крепление 4; $h = 13$ мм.
937	Стекловолокно с неперфорированным винилом. Крепление 4; $h = 25$ мм.
938	Стекловолокно, подклеенное тканым полотном из полиэстера. Крепление 2; $h = 50$ мм.

Таблица 5

Конструктивные особенности звукопоглощающих плит

№	a_1 , мм	a_2 , мм	№	a_1 , мм	a_2 , мм	№	a_1 , мм	a_2 , мм	№	a_1 , мм	a_2 , мм	№	a_1 , мм	a_2 , мм
500	1008	–	702	200	–	734	0	–	763	200	100	792	–	–
501	655	–	703	50	–	735	100	–	764	50	0	793	–	–
502	403	–	704	0	–	736	50	–	765	50	50	794	50	–
503	277	–	705	100	–	737	0	–	766	100	100	795	50	–
504	103	–	706	150	–	738	–	–	767	100	50	796	50	–
505	68	–	707	0	–	739	–	–	768	50	0	797	50	–
506	1260	–	708	–	–	740	–	–	769	50	50	798	100	–
507	832	–	709	–	–	741	50	–	770	100	50	799	100	100
508	504	–	710	–	–	742	0	–	771	150	100	800	150	–
509	328	–	711	–	–	743	100	–	772	200	100	801	200	50
510	202	–	713	20	–	744	100	100	773	50	50	802	50	–
511	139	–	714	50	–	745	100	50	774	150	–	803	50	50
512	882	–	715	–	–	746	150	–	775	50	–	804	0	–
513	554	–	718	50	–	747	150	50	776	100	–	805	0/30	–
514	328	–	719	50	50	748	50	50	777	200	–	806	0/50	–
515	227	–	720	50	–	749	100	100	778	50	–	807	0	–
516	139	–	721	–	–	750	100	50	779	100	100	808	0	–
517	93	–	722	0	–	751	200	100	780	100	50	809	100	–
518	1134	–	723	–	–	752	50	0	781	150	–	810	50	–
519	655	–	724	–	–	753	50	50	782	150	50	811	0	–
520	428	–	725	–	–	754	100	100	783	50	–	812	100	–
521	252	–	726	–	–	755	100	50	784	50	50	813	–	–
522	164	–	727	–	–	756	160	100	785	100	–	900	–	–
523	958	–	728	–	–	757	200	100	786	200	–	901	–	–
524	529	–	729	–	–	758	50	50	787	50	–	902	–	–
525	328	–	730	100	–	759	100	100	788	–	–	903	–	–
526	202	–	731	0	–	760	50	50	789	–	–	904	–	–
700	100	–	732	0	–	761	100	100	790	–	–	905	–	–
701	100	100	733	50	–	762	100	50	791	–	–	906	–	–

Окончание табл. 5

№	a_1 , мм	a_2 , мм	№	a_1 , мм	a_2 , мм	№	a_1 , мм	a_2 , мм	№	a_1 , мм	a_2 , мм	№	a_1 , мм	a_2 , мм
907	–	–	913	–	–	923	–	–	929	–	–	935	–	–
908	–	–	914	–	–	924	–	–	930	–	–	936	–	–
909	–	–	915	–	–	925	–	–	931	–	–	937	–	–
910	–	–	916	–	–	926	–	–	932	–	–	938	–	–
911	–	–	917	–	–	927	–	–	933	–	–			
912	–	–	918	–	–	928	–	–	934	–	–			

Таблица 6

Коэффициенты звукопоглощения акустических материалов

№	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
500	0,65	0,30	0,16	0,13	0,12	0,11
501	0,65	0,30	0,16	0,13	0,12	0,11
502	0,65	0,30	0,16	0,13	0,12	0,11
503	0,55	0,25	0,14	0,12	0,11	0,10
504	0,42	0,20	0,13	0,11	0,10	0,09
505	0,42	0,20	0,13	0,11	0,10	0,09
506	0,65	0,30	0,16	0,13	0,12	0,11
507	0,65	0,30	0,16	0,13	0,12	0,11
508	0,55	0,25	0,14	0,12	0,11	0,10
509	0,55	0,25	0,14	0,12	0,11	0,10
510	0,42	0,20	0,13	0,11	0,10	0,09
511	0,42	0,20	0,13	0,11	0,10	0,09
512	0,55	0,25	0,14	0,12	0,11	0,10
513	0,55	0,25	0,14	0,12	0,11	0,10
514	0,42	0,20	0,13	0,11	0,10	0,09
515	0,42	0,20	0,13	0,11	0,10	0,09
516	0,42	0,20	0,13	0,11	0,10	0,09
517	0,34	0,18	0,13	0,12	0,11	0,10
518	0,55	0,25	0,14	0,12	0,11	0,10
519	0,55	0,25	0,14	0,12	0,11	0,10
520	0,42	0,20	0,13	0,11	0,10	0,09
521	0,34	0,18	0,13	0,12	0,11	0,10
522	0,34	0,18	0,13	0,12	0,11	0,10
523	0,55	0,25	0,14	0,12	0,11	0,10
524	0,42	0,20	0,13	0,11	0,10	0,09
525	0,42	0,20	0,13	0,11	0,10	0,09
526	0,34	0,18	0,13	0,12	0,11	0,10
700	0,32	0,21	0,16	0,09	0,06	0,03
701	0,38	0,28	0,21	0,10	0,05	0,04
702	0,24	0,14	0,08	0,08	0,06	0,05
703	0,15	0,19	0,12	0,05	0,05	0,03
704	0,03	0,03	0,08	0,09	0,08	0,03

Продолжение табл. 6

№	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
705	0,08	0,27	0,46	0,35	0,54	0,60
706	0,13	0,42	0,53	0,35	0,53	0,63
707	0,06	0,16	0,25	0,38	0,59	0,63
708	0,00	0,00	0,39	0,42	0,42	0,39
709	0,00	0,00	0,73	0,72	0,84	0,80
710	0,32	0,40	0,36	0,35	0,37	0,35
711	0,60	0,73	0,80	0,82	0,81	0,70
713	0,20	0,25	0,11	0,05	0,11	0,10
714	0,20	0,28	0,15	0,12	0,15	0,16
715	0,29	0,28	0,17	0,13	0,15	0,17
718	0,36	0,26	0,16	0,08	0,13	0,27
719	0,59	0,34	0,23	0,12	0,11	0,08
720	0,14	0,28	0,18	0,09	0,12	0,25
721	0,10	0,36	0,38	0,36	0,45	0,55
722	0,10	0,15	0,45	0,55	0,60	0,60
723	0,30	0,50	0,77	0,48	0,27	0,00
724	0,32	0,55	0,55	0,21	0,12	0,00
725	0,32	0,40	0,51	0,60	0,65	0,60
726	0,47	0,53	0,60	0,62	0,58	0,56
727	0,32	0,40	0,53	0,55	0,61	0,66
728	0,31	0,50	0,70	0,41	0,29	0,00
729	0,31	0,55	0,46	0,21	0,14	0,00
730	0,62	0,97	0,98	0,97	0,94	0,81
731	0,50	0,92	0,98	0,95	0,91	0,80
732	0,18	0,60	0,98	0,95	0,94	0,82
733	0,21	0,47	0,72	0,98	0,97	0,79
734	0,08	0,40	0,64	0,89	0,95	0,81
735	0,38	0,80	0,94	0,88	0,86	0,79
736	0,20	0,61	0,98	0,94	0,92	0,78
737	0,14	0,52	0,90	0,99	0,92	0,82
738	0,10	0,27	0,50	0,68	0,56	0,48
739	0,09	0,25	0,48	0,66	0,57	0,47
740	0,28	0,37	0,40	0,38	0,39	0,00
741	0,12	0,33	0,43	0,41	0,34	0,42
742	0,07	0,11	0,17	0,36	0,44	0,38
743	0,05	0,34	0,35	0,14	0,05	0,00
744	0,66	0,96	0,88	0,47	0,20	0,16
745	0,28	0,95	0,95	0,38	0,14	0,14
746	0,15	0,42	0,32	0,11	0,06	0,00
747	0,42	0,96	0,77	0,43	0,16	0,16
748	0,14	0,77	0,90	0,40	0,19	0,14
749	0,77	0,64	0,30	0,15	0,15	0,10

Продолжение табл. 6

№	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
750	0,40	0,70	0,30	0,12	0,10	0,05
751	0,80	0,58	0,27	0,14	0,12	0,10
752	0,06	0,42	0,20	0,07	0,07	0,06
753	0,37	0,68	0,31	0,15	0,10	0,09
754	0,65	0,90	0,64	0,28	0,15	0,12
755	0,25	0,96	0,66	0,26	0,16	0,10
756	0,39	0,87	0,58	0,33	0,15	0,10
757	0,78	0,98	0,68	0,27	0,16	0,12
758	0,23	0,90	0,72	0,35	0,18	0,15
759	0,19	0,90	0,76	0,28	0,15	0,10
760	0,68	0,88	0,41	0,17	0,14	0,10
761	0,40	0,84	0,40	0,16	0,14	0,12
762	0,98	0,88	0,52	0,21	0,16	0,14
763	0,06	0,22	0,31	0,12	0,10	0,08
764	0,31	0,99	0,51	0,14	0,14	0,10
765	0,50	0,89	0,97	0,60	0,32	0,26
766	0,27	0,84	0,96	0,36	0,32	0,26
767	0,78	0,98	0,95	0,53	0,32	0,27
768	0,06	0,08	0,07	0,16	0,10	0,08
769	0,23	0,85	0,99	0,54	0,31	0,28
770	0,43	0,69	0,33	0,17	0,10	0,10
771	0,51	0,60	0,33	0,15	0,10	0,10
772	0,86	0,68	0,39	0,17	0,13	0,10
773	0,26	0,88	0,38	0,29	0,12	0,10
774	0,06	0,47	0,30	0,11	0,04	0,00
775	0,00	0,09	0,36	0,22	0,04	0,02
776	0,07	0,37	0,45	0,26	0,12	0,08
777	0,14	0,47	0,24	0,16	0,03	0,00
778	0,05	0,16	0,55	0,31	0,03	0,07
779	0,58	0,74	0,45	0,28	0,02	0,00
780	0,23	0,71	0,39	0,22	0,05	0,00
781	0,22	0,41	0,24	0,13	0,07	0,00
782	0,53	0,64	0,40	0,08	0,05	0,00
783	0,06	0,32	0,35	0,12	0,07	0,00
784	0,18	0,78	0,44	0,20	0,05	0,00
785	0,07	0,47	0,31	0,12	0,06	0,04
786	0,25	0,40	0,19	0,12	0,07	0,00
787	0,04	0,33	0,40	0,16	0,05	0,03
788	0,41	0,40	0,33	0,25	0,20	0,22
789	0,25	0,30	0,33	0,22	0,20	0,21
790	0,30	0,42	0,35	0,23	0,19	0,20
791	0,32	0,35	0,30	0,25	0,20	0,23

Продолжение табл. 6

№	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
792	0,35	0,50	0,38	0,30	0,22	0,18
793	0,37	0,35	0,32	0,28	0,22	0,22
794	0,41	0,30	0,35	0,06	0,10	0,14
795	0,49	0,44	0,39	0,19	0,13	0,22
796	0,51	0,21	0,32	0,18	0,08	0,13
797	0,50	0,40	0,44	0,33	0,13	0,16
798	0,26	0,26	0,07	0,01	0,01	0,00
799	0,76	0,47	0,20	0,14	0,02	0,00
800	0,41	0,23	0,10	0,02	0,00	0,00
801	0,52	0,38	0,22	0,14	0,00	0,00
802	0,62	0,27	0,12	0,05	0,00	0,00
803	0,47	0,45	0,18	0,09	0,00	0,00
804	0,06	0,15	0,28	0,30	0,33	0,31
805	0,14	0,25	0,29	0,31	0,41	0,42
806	0,22	0,30	0,34	0,32	0,41	0,42
807	0,47	0,52	0,50	0,55	0,58	0,63
808	0,33	0,42	0,47	0,41	0,42	0,36
809	0,27	0,53	0,57	0,74	0,67	0,39
810	0,15	0,42	0,64	0,80	0,65	0,31
811	0,03	0,20	0,56	0,78	0,66	0,39
812	0,14	0,09	0,10	0,08	0,01	0,15
813	0,09	0,34	0,55	0,66	0,52	0,39
900	0,03	0,22	0,69	0,91	0,96	0,99
901	0,08	0,25	0,74	0,95	0,97	0,99
902	0,01	0,11	0,39	0,66	0,87	0,99
903	0,07	0,18	0,52	0,96	0,99	0,98
904	0,12	0,39	0,91	0,99	0,99	0,99
905	0,21	0,40	0,93	0,99	0,99	0,95
906	0,34	0,88	0,95	0,99	0,87	0,79
907	0,00	0,76	0,99	0,99	0,82	0,00
908	0,14	0,57	0,99	0,99	0,89	0,65
909	0,48	0,99	0,97	0,96	0,99	0,79
910	0,22	0,85	0,95	0,91	0,86	0,72
911	0,69	0,77	0,80	0,99	0,96	0,72
912	0,52	0,66	0,82	0,87	0,87	0,81
913	0,62	0,71	0,85	0,99	0,90	0,82
914	0,11	0,19	0,36	0,58	0,86	0,50
915	0,10	0,06	0,24	0,60	0,83	0,92
916	0,07	0,18	0,52	0,96	0,99	0,98
917	0,78	0,79	0,58	0,75	0,94	0,90
918	0,40	0,44	0,62	0,86	0,92	0,99
923	0,99	0,99	0,79	0,99	0,99	0,99

№	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
924	0,95	0,96	0,69	0,91	0,99	0,99
925	0,06	0,24	0,71	0,99	0,99	0,99
926	0,11	0,47	0,97	0,99	0,99	0,99
927	0,06	0,25	0,71	0,99	0,99	0,98
928	0,09	0,50	0,99	0,99	0,99	0,96
929	0,27	0,68	0,97	0,95	0,85	0,69
930	0,26	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
931	0,65	0,83	0,91	0,98	0,99	0,74
932	0,17	0,61	0,59	0,62	0,50	0,85
933	0,25	0,52	0,27	0,33	0,30	0,24
934	0,10	0,19	0,57	0,97	0,99	0,99
935	0,10	0,27	0,43	0,59	0,76	0,65
936	0,16	0,32	0,43	0,58	0,61	0,47
937	0,28	0,30	0,09	0,38	0,14	0,17
938	0,33	0,71	0,99	0,99	0,99	0,99

Таблица 7

Максимальные значения коэффициентов звукопоглощения

125 Гц							
№	α_{max}	№	α_{max}	№	α_{max}	№	α_{max}
923	0,99	503	0,55	504	0,42	701	0,38
762	0,98	508	0,55	505	0,42	793	0,37
772	0,86	509	0,55	510	0,42	718	0,36
751	0,80	512	0,55	511	0,42	517	0,34
749	0,77	513	0,55	514	0,42	521	0,34
799	0,76	518	0,55	515	0,42	522	0,34
500	0,65	519	0,55	516	0,42	526	0,34
501	0,65	523	0,55	520	0,42	700	0,32
502	0,65	801	0,52	524	0,42	715	0,29
506	0,65	796	0,51	525	0,42	798	0,26
507	0,65	797	0,50	788	0,41	702	0,24
802	0,62	795	0,49	794	0,41		
719	0,59	803	0,47	800	0,41		
250 Гц							
№	α_{max}	№	α_{max}	№	α_{max}	№	α_{max}
764	0,99	759	0,90	782	0,64	746	0,42
909	0,99	760	0,88	771	0,60	781	0,41
930	0,99	773	0,88	729	0,55	710	0,40
757	0,98	756	0,87	724	0,55	786	0,40
767	0,98	761	0,84	933	0,52	791	0,35
755	0,96	784	0,78	792	0,50	714	0,28
744	0,96	779	0,74	774	0,47	720	0,28
747	0,96	780	0,71	777	0,47	713	0,25
745	0,95	750	0,70	785	0,47	703	0,19

Окончание табл. 7

№	α_{max}	№	α_{max}	№	α_{max}	№	α_{max}
754	0,90	770	0,69	752	0,42		
758	0,90	753	0,68	790	0,42		
500 Гц							
№	α_{max}	№	α_{max}	№	α_{max}	№	α_{max}
769	0,99	732	0,98	748	0,90	740	0,40
907	0,99	736	0,98	723	0,77	787	0,40
908	0,99	765	0,97	728	0,70	775	0,36
928	0,99	929	0,97	778	0,55	743	0,35
938	0,99	766	0,96	808	0,47	783	0,35
730	0,98	910	0,95	776	0,45	789	0,33
731	0,98	735	0,94	741	0,43	763	0,31
1000 Гц							
№	α_{max}	№	α_{max}	№	α_{max}	№	α_{max}
737	0,99	925	0,99	810	0,80	726	0,62
904	0,99	926	0,99	811	0,78	708	0,42
905	0,99	927	0,99	809	0,74	937	0,38
906	0,99	733	0,98	738	0,68	768	0,16
911	0,99	912	0,87	739	0,66	704	0,09
913	0,99	711	0,82	813	0,66		
2000 Гц							
№	α_{max}	№	α_{max}	№	α_{max}	№	α_{max}
903	0,99	934	0,99	709	0,84	742	0,44
916	0,99	734	0,95	935	0,76	804	0,33
924	0,99	917	0,94	725	0,65		
931	0,99	914	0,86	936	0,61		
4000 Гц							
№	α_{max}	№	α_{max}	№	α_{max}	№	α_{max}
900	0,99	915	0,92	707	0,63	721	0,55
901	0,99	932	0,85	807	0,63	805	0,42
902	0,99	727	0,66	705	0,60	806	0,42
918	0,99	706	0,63	722	0,60	812	0,15

Таблица 8

Относительные значения коэффициентов звукопоглощения

№	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
125 Гц						
923	1,00	1,00	0,80	1,00	1,00	1,00
718	1,00	0,72	0,44	0,22	0,36	0,75
793	1,00	0,95	0,86	0,76	0,59	0,59
715	1,00	0,97	0,59	0,45	0,52	0,59
788	1,00	0,98	0,80	0,61	0,49	0,54
795	1,00	0,90	0,80	0,39	0,27	0,45
794	1,00	0,73	0,85	0,15	0,24	0,34
797	1,00	0,80	0,88	0,66	0,26	0,32
517	1,00	0,53	0,38	0,35	0,32	0,29
521	1,00	0,53	0,38	0,35	0,32	0,29

№	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
522	1,00	0,53	0,38	0,35	0,32	0,29
526	1,00	0,53	0,38	0,35	0,32	0,29
796	1,00	0,41	0,63	0,35	0,16	0,25
504	1,00	0,48	0,31	0,26	0,24	0,21
505	1,00	0,48	0,31	0,26	0,24	0,21
510	1,00	0,48	0,31	0,26	0,24	0,21
511	1,00	0,48	0,31	0,26	0,24	0,21
514	1,00	0,48	0,31	0,26	0,24	0,21
515	1,00	0,48	0,31	0,26	0,24	0,21
516	1,00	0,48	0,31	0,26	0,24	0,21
520	1,00	0,48	0,31	0,26	0,24	0,21
524	1,00	0,48	0,31	0,26	0,24	0,21
525	1,00	0,48	0,31	0,26	0,24	0,21
702	1,00	0,58	0,33	0,33	0,25	0,21
503	1,00	0,45	0,25	0,22	0,20	0,18
508	1,00	0,45	0,25	0,22	0,20	0,18
509	1,00	0,45	0,25	0,22	0,20	0,18
512	1,00	0,45	0,25	0,22	0,20	0,18
513	1,00	0,45	0,25	0,22	0,20	0,18
518	1,00	0,45	0,25	0,22	0,20	0,18
519	1,00	0,45	0,25	0,22	0,20	0,18
523	1,00	0,45	0,25	0,22	0,20	0,18
500	1,00	0,46	0,25	0,20	0,18	0,17
501	1,00	0,46	0,25	0,20	0,18	0,17
502	1,00	0,46	0,25	0,20	0,18	0,17
506	1,00	0,46	0,25	0,20	0,18	0,17
507	1,00	0,46	0,25	0,20	0,18	0,17
762	1,00	0,90	0,53	0,21	0,16	0,14
719	1,00	0,58	0,39	0,20	0,19	0,14
749	1,00	0,83	0,39	0,19	0,19	0,13
751	1,00	0,73	0,34	0,18	0,15	0,13
772	1,00	0,79	0,45	0,20	0,15	0,12
701	1,00	0,74	0,55	0,26	0,13	0,11
700	1,00	0,66	0,50	0,28	0,19	0,09
798	1,00	1,00	0,27	0,04	0,04	0,00
799	1,00	0,62	0,26	0,18	0,03	0,00
800	1,00	0,56	0,24	0,05	0,00	0,00
801	1,00	0,73	0,42	0,27	0,00	0,00
802	1,00	0,44	0,19	0,08	0,00	0,00
803	1,00	0,96	0,38	0,19	0,00	0,00

Продолжение табл. 8

№	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
250 Гц						
930	0,26	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
720	0,50	1,00	0,64	0,32	0,43	0,89
710	0,80	1,00	0,90	0,88	0,93	0,88
909	0,48	1,00	0,98	0,97	1,00	0,80
791	0,91	1,00	0,86	0,71	0,57	0,66
714	0,71	1,00	0,54	0,43	0,54	0,57
790	0,71	1,00	0,83	0,55	0,45	0,48
933	0,48	1,00	0,52	0,63	0,58	0,46
713	0,80	1,00	0,44	0,20	0,44	0,40
792	0,70	1,00	0,76	0,60	0,44	0,36
767	0,80	1,00	0,97	0,54	0,33	0,28
771	0,85	1,00	0,55	0,25	0,17	0,17
744	0,69	1,00	0,92	0,49	0,21	0,17
747	0,44	1,00	0,80	0,45	0,17	0,17
758	0,26	1,00	0,80	0,39	0,20	0,17
703	0,79	1,00	0,63	0,26	0,26	0,16
745	0,29	1,00	1,00	0,40	0,15	0,15
770	0,62	1,00	0,48	0,25	0,14	0,14
752	0,14	1,00	0,48	0,17	0,17	0,14
761	0,48	1,00	0,48	0,19	0,17	0,14
754	0,72	1,00	0,71	0,31	0,17	0,13
753	0,54	1,00	0,46	0,22	0,15	0,13
757	0,80	1,00	0,69	0,28	0,16	0,12
756	0,45	1,00	0,67	0,38	0,17	0,11
760	0,77	1,00	0,47	0,19	0,16	0,11
773	0,30	1,00	0,43	0,33	0,14	0,11
759	0,21	1,00	0,84	0,31	0,17	0,11
755	0,26	1,00	0,69	0,27	0,17	0,10
764	0,31	1,00	0,52	0,14	0,14	0,10
785	0,15	1,00	0,66	0,26	0,13	0,09
750	0,57	1,00	0,43	0,17	0,14	0,07
729	0,56	1,00	0,84	0,38	0,25	0,00
724	0,58	1,00	1,00	0,38	0,22	0,00
746	0,36	1,00	0,76	0,26	0,14	0,00
774	0,13	1,00	0,64	0,23	0,09	0,00
777	0,30	1,00	0,51	0,34	0,06	0,00
779	0,78	1,00	0,61	0,38	0,03	0,00
780	0,32	1,00	0,55	0,31	0,07	0,00
781	0,54	1,00	0,59	0,32	0,17	0,00

№	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
782	0,83	1,00	0,63	0,13	0,08	0,00
784	0,23	1,00	0,56	0,26	0,06	0,00
786	0,63	1,00	0,48	0,30	0,18	0,00
500 Гц						
938	0,33	0,72	1,00	1,00	1,00	1,00
741	0,28	0,77	1,00	0,95	0,79	0,98
928	0,09	0,51	1,00	1,00	1,00	0,97
735	0,40	0,85	1,00	0,94	0,91	0,84
732	0,18	0,61	1,00	0,97	0,96	0,84
730	0,63	0,99	1,00	0,99	0,96	0,83
731	0,51	0,94	1,00	0,97	0,93	0,82
736	0,20	0,62	1,00	0,96	0,94	0,80
808	0,70	0,89	1,00	0,87	0,89	0,77
910	0,23	0,89	1,00	0,96	0,91	0,76
929	0,28	0,70	1,00	0,98	0,88	0,71
908	0,14	0,58	1,00	1,00	0,90	0,66
789	0,76	0,91	1,00	0,67	0,61	0,64
769	0,23	0,86	1,00	0,55	0,31	0,28
766	0,28	0,88	1,00	0,38	0,33	0,27
765	0,52	0,92	1,00	0,62	0,33	0,27
763	0,19	0,71	1,00	0,39	0,32	0,26
776	0,16	0,82	1,00	0,58	0,27	0,18
748	0,16	0,86	1,00	0,44	0,21	0,16
778	0,09	0,29	1,00	0,56	0,05	0,13
787	0,10	0,83	1,00	0,40	0,13	0,08
775	0,00	0,25	1,00	0,61	0,11	0,06
728	0,44	0,71	1,00	0,59	0,41	0,00
740	0,70	0,93	1,00	0,95	0,98	0,00
723	0,39	0,65	1,00	0,62	0,35	0,00
743	0,14	0,97	1,00	0,40	0,14	0,00
783	0,17	0,91	1,00	0,34	0,20	0,00
907	0,00	0,77	1,00	1,00	0,83	0,00
1000 Гц						
726	0,76	0,85	0,97	1,00	0,94	0,90
937	0,74	0,79	0,24	1,00	0,37	0,45
711	0,73	0,89	0,98	1,00	0,99	0,85
911	0,70	0,78	0,81	1,00	0,97	0,73
913	0,63	0,72	0,86	1,00	0,91	0,83
912	0,60	0,76	0,94	1,00	1,00	0,93
768	0,38	0,50	0,44	1,00	0,63	0,50
809	0,36	0,72	0,77	1,00	0,91	0,53

№	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
906	0,34	0,89	0,96	1,00	0,88	0,80
704	0,33	0,33	0,89	1,00	0,89	0,33
733	0,21	0,48	0,73	1,00	0,99	0,81
905	0,21	0,40	0,94	1,00	1,00	0,96
810	0,19	0,53	0,80	1,00	0,81	0,39
738	0,15	0,40	0,74	1,00	0,82	0,71
737	0,14	0,53	0,91	1,00	0,93	0,83
739	0,14	0,38	0,73	1,00	0,86	0,71
813	0,14	0,52	0,83	1,00	0,79	0,59
904	0,12	0,39	0,92	1,00	1,00	1,00
926	0,11	0,47	0,98	1,00	1,00	1,00
925	0,06	0,24	0,72	1,00	1,00	1,00
927	0,06	0,25	0,72	1,00	1,00	0,99
811	0,04	0,26	0,72	1,00	0,85	0,50
708	0,00	0,00	0,93	1,00	1,00	0,93
2000 Гц						
924	0,96	0,97	0,70	0,92	1,00	1,00
917	0,83	0,84	0,62	0,80	1,00	0,96
931	0,66	0,84	0,92	0,99	1,00	0,75
725	0,49	0,62	0,78	0,92	1,00	0,92
936	0,26	0,52	0,70	0,95	1,00	0,77
804	0,18	0,45	0,85	0,91	1,00	0,94
722	0,17	0,25	0,75	0,92	1,00	1,00
742	0,16	0,25	0,39	0,82	1,00	0,86
935	0,13	0,36	0,57	0,78	1,00	0,86
914	0,13	0,22	0,42	0,67	1,00	0,58
934	0,10	0,19	0,58	0,98	1,00	1,00
734	0,08	0,42	0,67	0,94	1,00	0,85
903	0,07	0,18	0,53	0,97	1,00	0,99
916	0,07	0,18	0,53	0,97	1,00	0,99
709	0,00	0,00	0,87	0,86	1,00	0,95
4000 Гц						
812	0,93	0,60	0,67	0,53	0,07	1,00
807	0,75	0,83	0,79	0,87	0,92	1,00
806	0,52	0,71	0,81	0,76	0,98	1,00
727	0,48	0,61	0,80	0,83	0,92	1,00
918	0,40	0,44	0,63	0,87	0,93	1,00
805	0,33	0,60	0,69	0,74	0,98	1,00
706	0,21	0,67	0,84	0,56	0,84	1,00
932	0,20	0,72	0,69	0,73	0,59	1,00
721	0,18	0,65	0,69	0,65	0,82	1,00
705	0,13	0,45	0,77	0,58	0,90	1,00

№	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
915	0,11	0,07	0,26	0,65	0,90	1,00
707	0,10	0,25	0,40	0,60	0,94	1,00
901	0,08	0,25	0,75	0,96	0,98	1,00
900	0,03	0,22	0,70	0,92	0,97	1,00
902	0,01	0,11	0,39	0,67	0,88	1,00

Таблица 9

Коэффициенты звукопоглощения некоторых дополнительных абсорбентов

№	Описание	Частота, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	Кирпич, неглазурованный	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
2	Кирпич, неглазурованный, неокрашенный	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
3	Кирпич, неоштукатуренный	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
4	Бетон, отлитый, грубо обработанный, неокрашенный	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
5	Бетон, гладкий, неокрашенный	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
6	Бетонный блок, шероховатый	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25
7	Бетонный блок, неокрашенный	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
8	Бетонный блок, грубо обработанный	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
9	Пробка, $a_1 = 25$ мм	0,14	0,25	0,40	0,25	0,34	0,21
24	Мрамор или глазурованная плитка	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
43	Сосновые панели, $h = 19$ мм	0,02	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
57	Фанерные панели, $h = 3$ мм, $a_1 = 32$ мм	0,15	0,25	0,12	0,08	0,08	0,08
58	Фанерные панели, $h = 3$ мм, $a_1 = 57$ мм	0,28	0,20	0,10	0,10	0,08	0,08
60	Фанерные панели, $h = 5$ мм, $a_1 = 50$ мм	0,38	0,24	0,17	0,10	0,08	0,05
62	Фанерные панели, $h = 9$ мм, $a_1 = 50$ мм	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11
63	Фанера, вплотную к стене	0,18	0,26	0,24	0,10	0,10	0,10
64	Фанера, $a_1 = 50$ мм	0,10	0,11	0,06	0,08	0,08	0,11
68	Толстые деревянные панели	0,19	0,14	0,09	0,06	0,06	0,05
69	Сосновые листы, $h = 19$ мм	0,10	0,11	0,10	0,08	0,08	0,11
120	Занавес, хлопок, 360 г/м ²	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
121	Занавес, хлопок, 500 г/м ²	0,04	0,07	0,13	0,22	0,33	0,35
125	Занавес, бархат, 650 г/м ²	0,05	0,12	0,35	0,45	0,38	0,36
126	Занавес, бархат, 650 г/м ² , $a_1 = 100$ мм	0,06	0,27	0,44	0,50	0,40	0,35
127	Занавес, бархат, 650 г/м ² , $a_1 = 200$ мм	0,08	0,29	0,44	0,50	0,40	0,35
128	Ткань, хлопок, 475 г/м ² , вплотную к стене	0,04	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35
131	Драпировка, велюр, 340 г/м ² , вплотную к стене	0,04	0,05	0,11	0,18	0,30	0,35
137	Драпировка, велюр, 610 г/м ² , $a_1 = 150$ мм	0,08	0,13	0,50	0,56	0,50	0,56
139	Драпировка, велюр, 610 г/м ² , вплотную к стене	0,05	0,12	0,35	0,48	0,38	0,36
140	Драпировка, велюр, 815 г/м ² , вплотную к стене	0,30	0,60	0,65	0,75	0,85	0,90

№	Описание	Частота, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
141	Драпировка, велюр, 1085 г/м ² , $a_1 > 300$ мм	0,60	0,70	0,80	0,85	0,85	0,85
142	Драпировка, велюр, 1085 г/м ² , вплотную к стене	0,30	0,60	0,75	0,80	0,85	0,85
200	Стулья, занятые на 2/3	0,21	0,29	0,35	0,59	0,61	0,59
201	Стулья, занятые полностью	0,30	0,41	0,49	0,84	0,87	0,84
202	Стулья, свободные	0,04	0,05	0,06	0,10	0,10	0,08
212	Сиденья с мягкой обивкой, занятые на 2/3	0,44	0,56	0,65	0,72	0,72	0,67
213	Сиденья с мягкой обивкой, свободные	0,32	0,40	0,42	0,44	0,43	0,48
214	Сиденья с мягкой обивкой, полностью занятые	0,50	0,64	0,76	0,86	0,86	0,76
215	Сиденья жесткие, занятые на 2/3	0,37	0,40	0,47	0,53	0,56	0,53
216	Сиденья жесткие, свободные	0,10	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08
217	Сиденья жесткие, полностью занятые	0,50	0,56	0,66	0,76	0,80	0,76
218	Сиденья, обитые тканью, свободные	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70
219	Сиденья, обитые тканью, полностью занятые	0,60	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85
220	Сиденья, обитые кожей, занятые на 2/3	0,55	0,67	0,80	0,85	0,81	0,73
221	Сиденья, обитые кожей, свободные	0,44	0,54	0,60	0,62	0,58	0,50
223	Театральные сиденья, деревянные, занятые на 2/3	0,34	0,21	0,28	0,53	0,56	0,53
224	Театральные сиденья, деревянные, свободные	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,08
225	Театральные сиденья, деревянные, полностью занятые	0,50	0,30	0,40	0,76	0,80	0,76



Рис. 8. Студия записи и сведения звукового сопровождения кинофильмов Shepperton Sound Theatre 1, Шеппертон, Англия.



Рис. 9. Студия записи ирландской народной музыки Суан, Голуэй, Ирландия.



Рис. 10. Студия звукозаписи Propeller Mastering, Осло, Норвегия.

2. ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ ПОМЕЩЕНИЙ СТУДИЙНОГО КОМПЛЕКСА

Если стены, пол, потолок помещения обладают звукопроводностью, то часть звуковой энергии из смежных помещений или открытых пространств (улица, площадь и т.п.) может проникать в данное помещение, создавая в нем шумовые помехи. Допустимые уровни шума в помещениях для записи и воспроизведения звука представлены в табл. 10. Нормирующие кривые для уровня шума в залах и студиях представлены на рис. 11.

Таблица 10

Допустимые уровни шума в помещениях для записи и воспроизведения звука

№	Наименование	Уровни звукового давления $N_{\text{доп}}$, дБ в октавных полосах с центральными частотами $F_{\text{ц}}$, Гц						$N_{\text{ЭКВ}}$, дБА
		125	250	500	1000	2000	4000	
1	Павильоны синхронной съёмки. Ателье перезаписи	35	30	25	20	20	20	25
2	Ателье для записи музыки	32	25	22	20	20	20	28
3	Тон-ателье для записи речи и шумов	30	20	17	16	15	15	25
4	Тон-ателье перезаписи	35	30	25	22	20	20	30
5	Кинотеатры: одноканальное воспроизведение	52	45	39	35	32	30	35
6	Кинотеатры: многоканальное воспроизведение	48	41	35	32	30	28	30
7	Комнаты (залы) прослушивания	35	28	22	15	10	8	15
8	Просмотровые залы, видеозалы	40	33	26	22	19	17	20
9	Киноконцертные залы, залы многоцелевого назначения	48	40	34	30	27	25	35
10	Радиовещательные студии	20	15	12	12	12	11	15

Если в самом помещении также имеется источник шумовых помех (например, отверстия вентиляционных каналов), то диффузная сила звука J всех помех, суммарная мощность которых P , будет равна

$$J = \frac{4 \cdot P}{\alpha \cdot S} \quad (3)$$

где $\alpha \cdot S = A$ – общее число единиц звукопоглощения в данном помещении, определяемое как средняя величина результатов, полученных на всех расчетных частотах при вычислении времени реверберации.

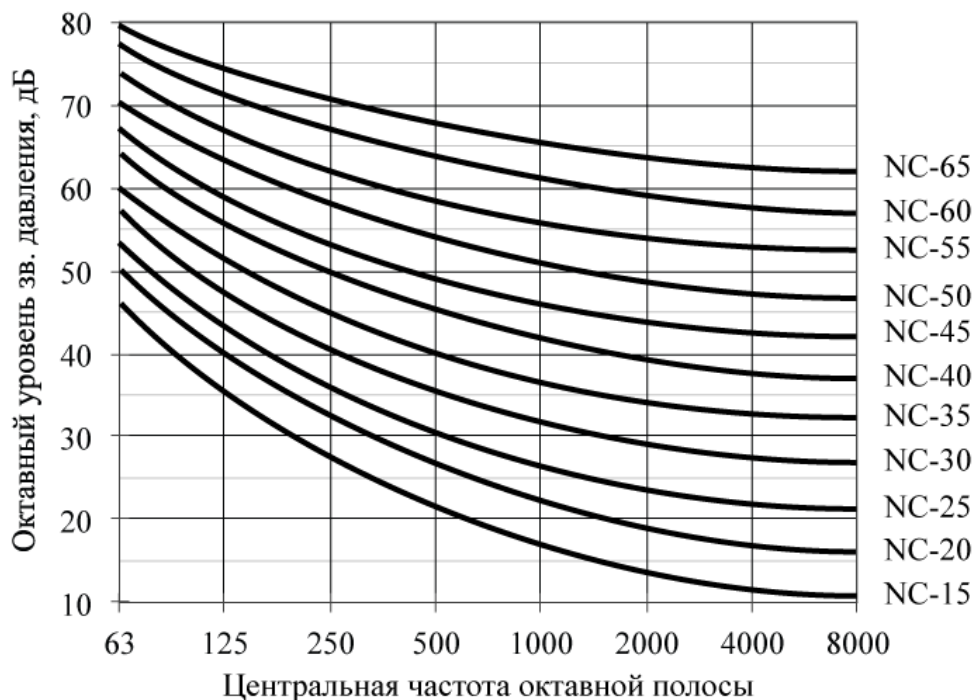


Рис. 11. Нормирующие кривые для уровня шума в залах и студиях.

Предположим, что диффузная сила звука в одном из смежных помещений равна J_k , площадь стены, граничащей с этим помещением равна S_k , а коэффициент звукопроводности равен Y_k . Тогда звуковая мощность, проникающая в помещение, равна

$$P_k = J_k \cdot S_k \cdot \frac{Y_k}{4} \quad (4)$$

Заметим, что при диффузном падении звуковой энергии на внешнюю сторону стены, проходящая сквозь нее акустическая мощность уменьшается в 4 раза (без учета коэффициента звукопроводности). Если различные участки площади стен, пола, потолка граничат с различными смежными помещениями, то в соответствии с формулами (3) и (4) диффузная сила звука помех в помещении

$$J = \frac{4}{\alpha S} \left(\frac{J_1 S_1 \gamma_1}{4} + \dots + \frac{J_n S_n \gamma_n}{4} + P_B \right) \quad (5)$$

где P_B – звуковая мощность, излучаемая из отверстий вентиляционных каналов, равная произведению суммарной площади каналов S_B , на излучаемую в помещение силу звука J_B , то есть $P_B = S_B \cdot J_B$.

Эти акустические помехи обычно называют «воздушными» в отличие от «ударных» (обусловленных ударами по внешней стороне преград, шага-

ми в помещении верхнего этажа и т.п.) и «вибрационных» (обусловленных вибрациям механизмов, установленных как в самом помещении, так и в соседних).

В данном пособии рассматривается метод расчета звукоизоляции помещения от воздушных помех. Защита от ударных и вибрационных шумов требует применения сложных механических конструкций, амортизаторов и других мер, детально не рассматриваемых в дисциплинах «Электроакустика и звуковое вещание» направления 210700 и «Акустика» направления 210400.

Целью расчета звукоизоляции помещения от воздушных помех является обеспечение заданного уровня этих помех

$$N_0 = 10 \cdot \lg \frac{J}{J_0}, \text{ дБ} \quad (6)$$

где J_0 – постоянная величина, по отношению которой N_0 отсчитывается в дБ (обычно $J_0 = 10^{-12}$ Вт/м²).

Вместо сил звуков $J_1 \dots J_n$ в смежных помещениях и коэффициентов звукопроводности ограждений $\gamma_1 \dots \gamma_n$, в расчетные формулы обычно вводятся соответственно акустические уровни силы звука и коэффициенты звукоизоляции, т.е.

$$N_1 = 10 \cdot \lg \frac{J_1}{J_0}, \dots, N_n = 10 \cdot \lg \frac{J_n}{J_0} \quad (7)$$

$$\sigma_1 = 10 \cdot \lg \frac{1}{\gamma_1}, \dots, \sigma_n = 10 \cdot \lg \frac{1}{\gamma_n} \quad (8)$$

Напомним, что коэффициент звукоизоляции определяет ослабление уровня силы звука при прохождении звуковой энергии сквозь преграду, коэффициент звукопроводности которой равен γ . Формула (6) примет вид:

$$\frac{J}{J_0} = 10^{\frac{N_B}{10}} + \frac{1}{\alpha S} \sum_1^n S_k \cdot 10^{\frac{(N_k - \sigma_k)}{10}} = \exp(0,23N_B) + \frac{1}{\alpha S} \sum_1^n S_k \cdot \exp(0,23(N_k - \sigma_k)) \quad (9)$$

где N_B – уровень шума в помещении, вызванный работой вентиляционной системы.

Заметим, что вместо вычисления величин 10^x для практических расчетов бывает удобнее пользоваться равной величиной $\exp(0,23x)$, так как таблицы числовых значений экспоненциальных функций имеются во многих математический и радиотехнических справочниках.

Для вычисления всех входящих в (9) площадей $S_1...S_n$ необходимо иметь план расположения всех смежных помещений и высоту их стен.

Акустические уровни во всех смежных помещениях $N_1...N_n$, измеряются или определяются по табл. 11.

Коэффициенты звукоизоляции различных преград могут быть измерены, определены по табл. 12 или вычислены.

Для вычисления σ имеются следующие расчетные формулы.

Если вес 1 м² площади ординарной стены $Q < 200$ кг, то

$$\sigma = 13,7 \cdot \lg Q + 14 \quad (10)$$

Если $Q > 200$ кг, то

$$\sigma = 21,51 \cdot \lg Q - 14 \quad (11)$$

При $Q = 200$ кг обе формулы дают одинаковый результат $\sigma = 45,5$ дБ.

Таблица 11

Уровни звука и воздушных шумов в помещениях

№	Источник шума	N_k , дБ	N_0 , дБ
1	Большая и малая телевизионные студии	105	30
2	Макетно-дикторская студия	100	30
3	Концертная радиовещательная студия	105	25
4	Камерная радиовещательная студия	85	25
5	Речевая радиовещательная и дикторская телевизионная студии	85	25
6	Аппаратные с громкоговорителями	85	40
7	Кинопроекционная	95	45
8	Кинопросмотровый зал	100	40
9	Репетиционная	95	40
10	Фойе, коридор	85	–
11	Коридор с мягкими дорожками при тихом разговоре	55	–
12	Декорационная	60	–
13	Канцелярия с пишущими машинками	65...70	–
14	Редакционные помещения	60...65	–
15	Улица с интенсивным движением	90	–
16	То же, но со средней интенсивностью движения	до 80	–
17	Тихая улица	60...70	–
18	Служебные помещения при тихом разговоре	60	–
19	То же, но при громком разговоре	80	–
20	Чердачное помещение	75	–
21	Подвальное помещение без людей	60	–
22	Тамбур	50	–

Примечание: N_k – уровень силы звука в помещении; N_0 – допустимый уровень воздушных шумов в этом же помещении.

Таблица 12

Коэффициенты звукоизоляции преград

№	Преграда	Толщина, мм	Вес 1м ² , кг	, дБ
1	Кирпичная оштукатуренная стена	140	240	47
2	То же	270	460	53
3	То же	400	680	56
4	То же	530	900	59
5	То же	660	1120	61
6	То же	790	1340	63
7	То же	920	1560	64,5
8	Доски оштукатуренные	60	20	30
9	Щиты, обитые фанерой, оштукатуренные	90	85	40
10	Каркас из брусков, обшитый досками, оштукатуренный	150	80	40
11	Доски с прокладкой картоном, оштукатуренные	120	95	41
12	Шлакоалебастровые плиты, оштукатуренные	90	110	41
13	То же	160	180	44
14	Кирпичный каркас, обшитый досками, оштукатуренный	80	175	44
15	Шлакобетон	230	280	47
16	Железобетон	100	180	44
17	То же, но со шлаковой засыпкой	–	–	65
18	Окно с двойными стеклами	–	–	25
19	Междуэтажное перекрытие, типовое с воздушным промежутком	–	–	55
20	То же, но акустически обработанное	–	–	65
21	Двойная дверь с тамбуром	–	–	50
22	Дверь с прокладкой	–	–	29
23	Двухстекольное смотровое окно с тщательной звукозащитой	–	–	45
24	Трехстекольное смотровое окно (стекла разной толщины)	–	–	50...55
25	Ворота телевизионной студии	–	–	25

Толщина Δ [мм] ординарной стены и вес Q связаны зависимостью

$$\Delta = 0,59Q. \quad (12)$$

Для двойных стен с воздушным промежутком

$$\sigma = 7,4 - 6,4 \cdot \exp(-0,405(D - 3)) + 20 \cdot \lg(Q_1 - Q_2) \quad (13)$$

где D – толщина воздушного промежутка в см; Q_1 и Q_2 – вес 1м² площади стены до и после воздушного промежутка. Формула (13) справедлива при Q_1 и $Q_2 > 200$ кг и $D \geq 3$ см.

Применять воздушные промежутки толщиной более 9 см нецелесообразно, так как при этом σ увеличивается менее чем на 0,6 дБ.

При вычислениях по формуле (9) наибольшие затруднения вызывает подбор требуемых величин σ для обеспечения заданного значения N_0 . Выбор больших значений σ повышает стоимость ограждений (стен, пола, потолка). Малые величины σ приводят к уровню шума N_0 больше заданного значения. Следует учитывать, что шумовые помехи от работы вентиляционных устройств (или других источников) энергетически складываются с шумами, проникающими сквозь поверхности помещения (воздушными помехами).

Суммарный уровень акустических помех в помещении

$$N_0 = 10 \cdot \lg \left(\frac{J_n}{J_0} + \frac{J_B}{J_0} \right) \quad (14)$$

где J_0 – диффузная сила звука помех, проникающих сквозь поверхности, J_B – диффузная сила звука помех, например, от вентиляционных устройств.

Оборудованные специальными глушителями и амортизаторами вибраций моторов вентиляционные системы создают уровни помех в помещении порядка $N_B = 15 \dots 20$ дБ.

Методы расчета вентиляционных систем в данном пособии не рассматриваются. При расчете звукоизоляции требуется установить максимально допустимый уровень шума от работы вентиляционной установки, который должен находиться в указанных выше пределах.

Если задать допустимый уровень $N_B = 10 \cdot \lg \left(\frac{J_B}{J_0} \right)$ и суммарный уровень

помех N_0 , то в соответствии с (9)

$$\frac{J_n}{J_0} = \exp(0,23N_0) - \exp(0,23N_B) = \frac{1}{\alpha S} \sum_1^n S_k \cdot \exp(0,23(N_k - \sigma_k)). \quad (15)$$

Так как общее число единиц звукопоглощения (αS) известно из расчета времени стандартной реверберации, расчет звукоизоляции сводится к определению всех слагаемых суммы величин $S_k \cdot \exp[0,23(N_k - \sigma_k)]$, входящих в выражение (16), по заранее вычисленной допустимой величине всей суммы. Напомним, что N_k является уровнем силы звука в различных смежных помещениях. Эти уровни определяются по табл. 11.

Наибольшая трудность заключается в выборе коэффициентов звукоизоляции различных преград, а следовательно, и в выборе их конструкций.

Для предварительного ориентировочного выбора величин σ для каждой преграды приведем следующие соображения.

Наиболее благоприятно, если через площадь каждой поверхности данного помещения проникают приблизительно одинаковые шумовые помехи. Тогда отсутствуют «опасные» поверхности, вблизи которых помехи наиболее слышны. Если под знаком суммы в выражении (16) имеется n слагаемых и согласно принятому условию все слагаемые должны иметь одинаковую величину:

$$(\exp(0,23N_0) - \exp(0,23N_B)) \cdot \alpha S = N = n \cdot S_k \cdot \exp(0,23(N_k - \sigma_k)). \quad (16)$$

Величина N определяется из соотношения (16) по заданным значениям N_0 , N_B и αS . Тогда требуемый для различных преград коэффициент звукоизоляции

$$\sigma_k = N_k - 10 \cdot \lg\left(\frac{N}{n}\right) + 10 \cdot \lg S_k \quad (17)$$

Для разных преград N/n является постоянной величиной, а N_k и S_k – различны, причем площадь S_k должна быть в м^2 .

Формула (17) дает возможность вычислить требуемую величину σ_k для каждой преграды. Однако практически реализуемые коэффициенты звукоизоляции (табл. 12) могут отличаться от требуемых и поэтому слагаемые будут различны. Следует помнить, что повышение σ усложнит конструкцию стен, пола, потолка и увеличит стоимость их сооружения.

Исходными данными при расчете звукоизоляции являются планы расположения смежных помещений и их назначение. По этим данным определяется уровень силы звука во всех помещениях (табл. 11).

Основные принципы планировки помещений студийного комплекса заключаются в следующем.

1. Студия или блок студий (для сложных передач) должны иметь студийную аппаратную, расположенную в смежном помещении, желательно в торце студии для лучшего обозрения студии через смотровое окно.

2. Кроме студийной аппаратной в смежных со студией помещениях уровень звуковой энергии по возможности не должен превышать 60...70 дБ. При планировании помещений студийного комплекса следует выбирать смежные помещения со сравнительно небольшим уровнем сигнала в них.

3. Размеры студийной аппаратной (порядка 12...20 м^2) и время реверберации (порядка 0,4...0,5 с) должны соответствовать типовой жилой комнате, чтобы звукорежиссер мог прослушивать передаваемую программу в условиях аналогичных тем, какие существуют в комнате радиослушателя.

4. Пол студийной аппаратной должен быть на 25...50 см выше пола студии для лучшего обозрения студии через смотровое окно.

5. При студиях желательно планировать помещение (или стенной шкаф) для хранения музыкальных инструментов и необходимого реквизита, используемых при передачах из данной студии.

6. Вход в студию должен быть осуществлен через тамбур.

7. В малых (речевых, камерных) студиях допустимо иметь один вход. В больших студиях – два (вход и выход). В самых больших студиях следует иметь еще один (запасный) выход.

8. При студиях планируется фойе, в котором исполнители могут отдохнуть в перерывах передачи (или записи). Площадь фойе рассчитывается на размещение двойного количества людей относительно находящихся в студии, и берется равной не менее 15% площади обслуживаемых студий.

9. Для проведения репетиций предусматриваются специальные помещения.

10. Абсолютный уровень диффузного шума, проникающего в телевизионные студии из смежных помещений, не должен превышать 30 дБ, а в радиовещательные студии – 25 дБ. Зависимость допустимого уровня звукового давления шума в телевизионных и радиовещательных студиях от частоты представлена на рис. 12.

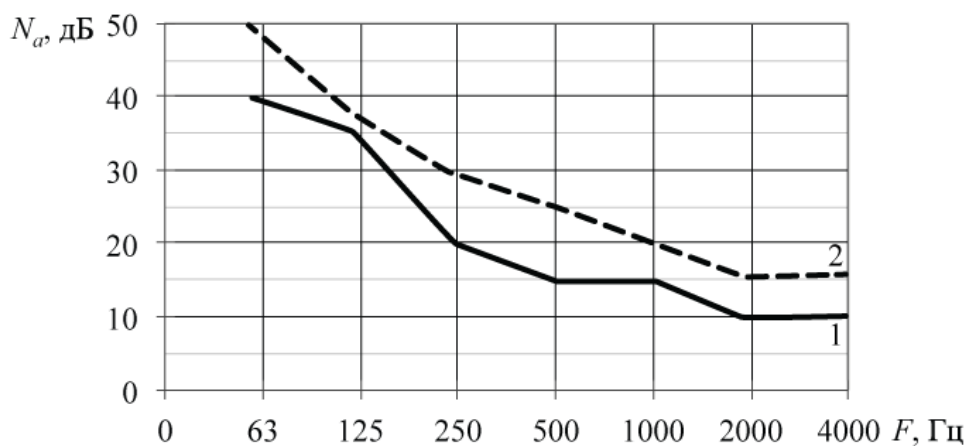


Рис. 12. Зависимость допустимого уровня звукового давления шума в радиовещательных 1 и телевизионных 2 студиях от частоты.

3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ АКУСТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ОБРАБАТЫВАЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ

Компьютерное моделирование и акустический анализ исследуемых помещений в рамках данного курсового проекта выполняется с помощью программной среды **Ulysses**. Подробная информация о построении трехмерной модели и размещении звукопоглощающих материалов приведена в приложениях 1 и 2 к данным методическим указаниям.

После создания трехмерной модели помещения выполняется анализ времени стандартной реверберации (см. Приложение 3). Зафиксируйте график и численные значения времени реверберации, полученные в результате анализа, и сравните их с результатами теоретического расчета.

Следует отметить, что в связи с невозможностью размещения в компьютерной модели некоторых элементов основного фонда звукопоглощения, использованных при выполнении теоретического расчета (таких как исполнители, стулья или декорации), результат расчета времени реверберации для такой модели будет иметь погрешность порядка 0,03..0,05 с, если поле в помещении идеальное диффузное, что трудно выполнимо на практике. Однако, среди звукопоглощающих материалов, используемых в программе **Ulysses** для облицовки пола, есть несколько поглотителей, учитывающих расстановку на полу помещения стульев, а также присутствие исполнителей и/или слушателей (материалы №200–225 в табл. 8).

В случае, если рассматриваемое помещение предполагает наличие в нем исполнителей и/или слушателей, вычислите площадь, занимаемую местами для их размещения, из расчета 0,7 м² на одно место. На полу смоделированного помещения разместите поверхность (или несколько поверхностей в случае зонирования помещения), размеры которой соответствуют рассчитанной площади, и присвойте ей один из материалов, соответствующий размещению на полу пустых стульев того или иного типа. Выполните процедуру анализа времени стандартной реверберации.

Повторите анализ времени стандартной реверберации для случаев частичного (2/3) и полного заполнения стульев, присваивая поверхностям, на которых они размещены, соответствующие материалы. Зафиксируйте все полученные результаты.

4. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПОМЕЩЕНИЯ

В настоящем разделе приведен пример выполнения акустического расчета звукопоглощающих материалов, звукоизоляции, а также компьютерного моделирования и анализа студийного помещения.

4.1. Расчет требуемой частотной характеристики времени стандартной реверберации помещения

Предположим, что нам необходимо произвести расчет помещения, имеющего размеры $l = 15$ м, $b = 10$ м, $h = 6$ м, и, следовательно, $V = 15 \cdot 10 \cdot 6 = 900$ м³, $S = 2 \cdot (15 \cdot 10 + 15 \cdot 6 + 10 \cdot 6) = 600$ м² и $V/S = 1,5$ м. Требуется обеспечить время стандартной реверберации $T = 0,6$ с с допустимыми пределами отклонения $\Delta T = \pm 0,15$ с, т.е.

$$T_{min} = 0,6 - 0,15 = 0,45 \text{ с,}$$

$$T_{max} = 0,6 + 0,15 = 0,75 \text{ с.}$$

На частоте 125 Гц требуется уменьшить длительность времени стандартной реверберации на 10%, т.е.

$$T_{min}(125 \text{ Гц}) = 0,45 - 0,6 \cdot 0,10 = 0,405 \text{ с,}$$

$$T_{max}(125 \text{ Гц}) = 0,75 - 0,6 \cdot 0,25 = 0,675 \text{ с.}$$

Требуемая частотная зависимость времени реверберации представлена на рис. 13.

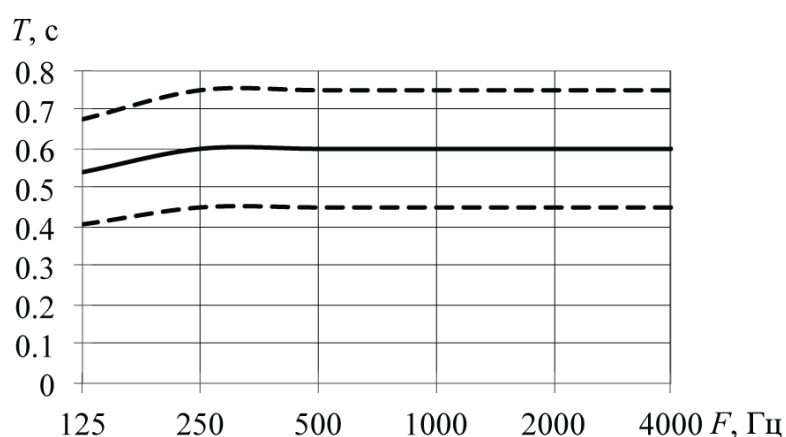


Рис. 13. Частотная зависимость требуемого времени реверберации (сплошная кривая) и допустимые отклонения (пунктир)

Находя величины S по табл. 2, учитывая, что $0,4V/S = 0,6$, и подставляя для каждой частоты значения T_{min} и T_{max} , произведем вычисления по формуле (2). Результаты вычислений представлены в табл. 13.

Теперь определим величины $(1 - \alpha_{cp})$, α_{cp} и $A = \alpha_{cp}S$ для каждой частоты. Очевидно, что при минимальной реверберации мы получим максимальное число единиц звукопоглощения и соответственно наоборот. Результаты расчета приведены в табл. 14.

Таблица 13

Пример расчета величины $\lg(1 - \alpha_{cp})$

$F, \text{Гц}$	$\lg(1 - \alpha_{cp})$	
	для T_{min}	для T_{max}
125	$0,6(0-0,175/0,405) = -0,259$	$0,6(0-0,175/0,675) = -0,156$
250 и 500	$0,6(0-0,175/0,45) = -0,233$	$0,6(0-0,175/0,75) = -0,139$
1000	$0,6(0,003-0,175/0,45) = -0,232$	$0,6(0-0,175/0,75) = -0,138$
2000	$0,6(0,01-0,175/0,45) = -0,227$	$0,6(0-0,175/0,75) = -0,134$
4000	$0,6(0,03-0,175/0,45) = -0,215$	$0,6(0-0,175/0,75) = -0,122$

Таблица 14

Пример расчета единиц звукопоглощения

$F, \text{Гц}$	125		250 и 500		1000		2000		4000	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
$\lg(1 - \alpha_{cp})$	-0,26	-0,16	-0,23	-0,14	-0,23	-0,14	-0,23	-0,14	-0,23	-0,13
$1 - \alpha_{cp}$	0,55	0,70	0,58	0,72	0,59	0,73	0,59	0,73	0,59	0,73
α_{cp}	0,45	0,30	0,42	0,28	0,41	0,27	0,41	0,27	0,41	0,27
$A = \alpha_{cp}S$	269,7	180,6	249,4	165,3	248,9	164,7	247,9	163,5	244,5	159,3

На рис. 14 графически показано необходимое количество единиц звукопоглощения. Частотная характеристика реверберации, получаемая при подборе звукопоглощающих материалов, должна находиться в пределах, показанных на рис. 14. На том же рисунке сплошной линией показана кривая, полученная в результате расчета, который приводится ниже.

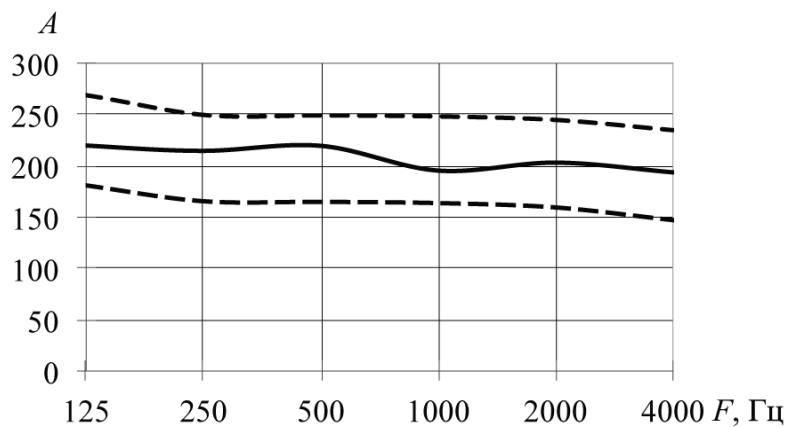


Рис. 14. Пределы возможного отклонения количества единиц звукопоглощения от требуемого (для данного помещения)

4.2. Расчет звукопоглощения, вносимого основным фондом

Определим число единиц звукопоглощения, вносимых основным фондом. Заметим, что единицы звукопоглощения инвентаря умножаются на его количество. Расчет ведется, исходя из оптимального числа исполнителей, которое в нашем примере равно 10. Кроме того, учитывая, что площадь пола $l \cdot b = 150 \text{ м}^2$, к основному фонду отнесем ковер площадью в 50 м^2 . Остальные абсорбенты, относящиеся к основному фонду для нашей студии, перечислены в табл. 14 (взяты из табл. 3).

Оставшаяся площадь $S - S_0 = 600 - 159 = 441 \text{ м}^2$.

В табл. 15 в строке «Следует добавить» требуемое число единиц звукопоглощения A взято по табл. 14. Добавочное число единиц звукопоглощения для каждой расчетной частоты должно оказаться в пределах, указанных в последней строке табл. 15.

Таблица 15

Пример расчета звукопоглощения, вносимого основным фондом

Абсорбенты	Кол-во или площ.	125 Гц		250 Гц		500 Гц		1000 Гц		2000 Гц		4000 Гц	
		α	A	α	A	α	A	α	A	α	A	α	A
Исполнители	10 чел.	0,28	2,8	0,40	4,0	0,45	4,5	0,49	4,9	0,47	4,7	0,45	4,5
Инвентарь	20 шт.	0,23	4,6	0,26	5,2	0,26	5,2	0,29	5,8	0,32	6,4	0,36	7,2
Ковёр (№101)	50 м^2	0,05	2,5	0,05	2,5	0,15	7,5	0,30	15,0	0,50	25,0	0,55	27,5
Пол (линолеум) (№208)	100 м^2	0,02	2,0	0,02	2,0	0,03	3,0	0,03	3,0	0,04	4,0	0,04	4,0
Окно в студийную аппаратную (№16)	3 м^2	0,35	1,1	0,25	0,8	0,18	0,5	0,12	0,4	0,07	0,2	0,04	0,1
Вентиляционные решетки (№438)	3 м^2	0,30	0,9	0,40	1,2	0,50	1,5	0,50	1,5	0,50	1,5	0,40	1,2
Двери, 1 шт. (№10)	3 м^2	0,10	0,3	0,07	0,2	0,05	0,2	0,04	0,1	0,04	0,1	0,04	0,1
Итого $S_0 = 159 \text{ м}^2$:		$A_0=14,15$		$A_0=15,86$		$A_0=22,39$		$A_0=30,68$		$A_0=41,93$		$A_0=44,64$	
Следует добавить $A-A_0$:		255,6..166,5		233,5..149,5		226,5..142,3		217,3..132,9		202,5..117,4		189,9..102,3	

4.3. Расчет звукопоглощения, вносимого специальными материалами и конструкциями

На основании данных, полученных в п. 4.2, рассчитаем звукопоглощение, вносимое специальными материалами.

Для облицовки нижней части стен применим фанерную панель высотой 1 м. При составлении табл. 12 взято помещение, длина которого $l = 15 \text{ м}$, ширина $b = 10 \text{ м}$. Периметр студии $2 \cdot (l + b) = 50 \text{ м}$. Считая, что

ширина двери 1,5 м, получаем длину панели равной 48,5 м и площадью 48,5 м².

Составим табл. 16 подбора абсорбентов.

В верхней строке табл. 16 указаны расчетные частоты. В следующей строке – средние величины единиц звукопоглощения ($A - A_0$), которые необходимо добавить (по данным табл. 15).

Сведения о панелях были приведены в табл. 9. Панель №43 имеет малый коэффициент звукопоглощения на низких частотах, а в вышеуказанном примере на этих частотах необходимо получить наибольшее число единиц звукопоглощения. Панели №58, 60 и 62 имеют большие коэффициенты звукопоглощения на частотах 125, 250 и 500 Гц, и могут быть успешно применены в тех случаях, когда требуемое количество единиц звукопоглощения на низких частотах значительно превышает требуемое число единиц звукопоглощения на верхних частотах. В рассматриваемом случае это соотношение невелико, поэтому выбираем панель №68, имеющую меньшее значение коэффициента звукопоглощения на низких частотах, чем панель №58, 60, 62. Соответствующие величины α заносим в табл. 16.

Если бы требовалось подобрать один вид специального поглотителя, то это можно было бы сделать, используя данные табл. 8. Для этого достаточно подсчитать относительное число единиц звукопоглощения, которое осталось добавить на каждой расчетной частоте (после установки панели).

Максимальное число единиц звукопоглощения ($211 - 9,2 = 208,1$) соответствует частоте 125 Гц; на частоте 250 Гц следует добавить соответственно $191,5 - 6,8 = 184,7$ и т.д.

Таким образом, легко подсчитать, что на расчетных частотах относительное число единиц звукопоглощения соответственно составит: 1; 0,92; 0,89; 0,85; 0,78; 0,71. По табл. 8 легко найти материал, которому соответствует 1,0 при 125 Гц и приблизительно 0,71 при 4000 Гц с монотонным изменением указанных величин. Такими свойствами обладает материал №793. Однако установив величины α этого материала из табл. 6 очевидно, что этот материал является слабым поглотителем, так как его коэффициенты звукопоглощения малы. Для размещения этого материала понадобится площадь, равная $208,1/0,37 = 562 \text{ м}^2$ (по данным для частоты 125 Гц). Однако при составлении табл. III было установлено, что площадь для размещения специальных абсорбентов $S - S_0 = 441 \text{ м}^2$. Поэтому следует идти по другому пути. Из этой площади 48,5 м² занимает панель, следовательно, свободной осталась площадь в 392,5 м².

Попробуем применить хотя бы два разных поглотителя: низкочастотный и высокочастотный. Разделим приблизительно поровну оставшуюся площадь. Как уже упоминалось, ассортимент высокочастотных абсорбентов меньше. Начнем подбор с них. Если считать, что площадь высокочастотного поглотителя порядка 190...200 м², а из требуемых на частоте

4000 Гц 144-х единиц звукопоглощения высокочастотный абсорбент должен внести около 120..130 единиц, то $\alpha_{\max} = 125/195 = 0,64$. По табл. 7 находим, что близкими данными обладают поглотители №705, 706, 707, 722, 727 и 807 ($\alpha_{\max} = 0,60..0,66$ при $F = 4000$ Гц), однако, поглотители №705, 706 и 727 имеют слишком значительные коэффициенты звукопоглощения на низких частотах, №707 – не достаточно высокий коэффициент звукопоглощения на частоте 1000 Гц, а №807 равномерно поглощает на всех расчетных частотах. Таким образом, оптимальным является использование поглотителя №722. Найдя в табл. 6 все коэффициенты звукопоглощения и считая занимаемую им площадь $S = 195 \text{ м}^2$, заносим все данные в табл. 16.

Таблица 16

Пример расчета специальных звукопоглощающих материалов

$S, \text{ м}^2$	F	125 Гц		250 Гц		500 Гц		1000 Гц		2000 Гц		4000 Гц	
	$A_{\text{доб.ср.}}$	211		192		184		175		160		146	
	№ погл.	α	A	α	A	α	A	α	A	α	A	α	A
48.5	68	0,19	9,22	0,14	6,79	0,09	4,37	0,06	2,91	0,06	2,91	0,05	2,43
197.5	762	0,98	193,55	0,88	173,80	0,52	102,70	0,21	41,48	0,16	31,60	0,14	27,65
195	722	0,10	19,50	0,15	29,25	0,45	87,75	0,55	107,25	0,60	117,00	0,60	117,00
1-й итог:		222,27		209,84		194,82		151,64		151,51		147,08	
411 м ²	A_c												
$A_{\text{доб.ср.}} - A_c$		-11,24		-18,33		-10,38		23,42		8,46		-0,96	
-17.5	762	0,98	-17,15	0,88	-15,40	0,52	-9,10	0,21	-3,68	0,16	-2,80	0,14	-2,45
17.5	722	0,10	1,75	0,15	2,63	0,45	7,88	0,55	9,63	0,60	10,50	0,60	10,50
2-й итог:		206,87		197,07		193,59		157,59		159,21		155,13	
411 м ²	A_c												
$A_{\text{доб.ср.}} - A_c$		4,16		-5,56		-9,16		17,47		0,76		-9,01	
30	811	0,03	0,90	0,20	6,00	0,56	16,80	0,78	23,40	0,66	19,80	0,39	11,70
-30	722	0,10	-3,00	0,15	-4,50	0,45	-13,50	0,55	-16,50	0,60	-18,00	0,60	-18,00
3-й итог:		204,77		198,57		196,89		164,49		161,01		148,83	
411 м ²	A_c												
$A_{\text{доб.ср.}} - A_c$		6,26		-7,06		-12,46		10,57		-1,04		-2,71	
Допуск:		255,6..166,5		233,5..149,5		226,5..142,3		217,3..132,9		202,5..117,4		189,9..102,3	
$A_{\text{общ.}} = A_0 + A_c$		218,92		214,43		219,28		195,17		202,94		193,47	

Теперь подберем низкочастотный поглотитель.

На частоте 125 Гц число единиц звукопоглощения, внесенных панелью и поглотителем №722, равно $9,2 + 19,5 = 28,7$. Осталось добавить приблизительно $211 - 28,7 = 182,3$ единицы. Считая, что площадь низкочастотного абсорбента тоже порядка 195 м^2 , найдем, что коэффициент звукопоглощения на частоте 125 Гц должен иметь значение $\alpha_{\max} \cong 182,5/197,5 = 0,92$. Наиболее близкими данными (табл. 7) обладает поглотитель №762 ($\alpha_{\max} = 0,98$). Найдя по табл. 6 все значения α , заносим соответствующие данные в табл. 16.

Далее подсчитаем суммарное число единиц звукопоглощения, вносимое поглотителями №68, №722, №762 (строка «1-й итог» в табл. 16). Сравнивая полученные результаты с допустимыми пределами (табл. 15), замечаем, что на частоте 4000 Гц требования удовлетворены. Однако наблюдается значительный перебор единиц звукопоглощения на частотах 125, 250 и 500 Гц и их значительный недобор на частотах 1000 и 2000 Гц. Т.к. поглотитель №722 обладает большими значениями коэффициентов звукопоглощения на частотах 1000 и 2000 Гц, чем поглотитель №762, и малыми значениями – на частотах 125 и 250 Гц, целесообразно уменьшить площадь, занимаемую поглотителем №762 ($S_{762} = 180 \text{ м}^2$) в пользу поглотителя №722 ($S_{722} = 212,5 \text{ м}^2$) (строка «2-й итог» в табл. 16). При этом удастся привести полученное количество единиц звукопоглощения на частотах 125, 250 и 500 Гц к значениям, близких к требуемому, однако, недобор на частоте 1000 Гц будет по прежнему иметь существенное значение, а также появится перебор единиц звукопоглощения на частоте 4000 Гц. Следовательно, необходимо подобрать материал, имеющий α_{\max} на частоте 1000 Гц, при ничтожно малых значениях α на частотах 125, 250, 500, 2000 и 4000 Гц.

Из табл. 8 видно, что материала, удовлетворяющего этим требованиям, нет. Материалы, имеющие α_{\max} на частоте 1000 Гц, как правило, имеют высокие коэффициенты звукопоглощения также на частотах 500 и 2000 Гц, поэтому для использования подобного поглотителя понадобится заменить часть площади, занимаемой поглотителем №722. При этом необходимо подобрать такой материал, абсолютное значение коэффициента звукопоглощения которого на частоте 1000 Гц будет больше, а на частоте 4000 Гц – меньше, чем у поглотителя №722 (для того, чтобы дополнительно скорректировать небольшой перебор единиц звукопоглощения на этой частоте), при малых значениях α на частотах 125, 150 и 500 Гц.

Наиболее близкими свойствами обладают абсорбенты №738 и 811. Недостатком материала №738 является то, что коэффициент звукопоглощения на частоте 250 Гц в два раза больше, чем у поглотителя №722 (это приведет к большому перебору единиц звукопоглощения на этой частоте),

поэтому выбираем материал №811. Из табл. 6 следует, что при частоте 1000 Гц коэффициент звукопоглощения этого материала $\alpha = 0,78$. Так как на этой частоте нам надо добавить минимум $175 - 158 = 17$ единиц (табл. 15 и 16), то легко подсчитать площадь ΔS , занимаемую поглотителем №811, учитывая что коэффициент звукопоглощения при замене на частоте $F = 1000$ Гц увеличится на величину $0,78 - 0,55 = 0,23$. Тогда $\Delta S = 17/0,23 = 73 \text{ м}^2$. Однако, коэффициент звукопоглощения на частоте 500 Гц у поглотителя №811 больше, чем у №722, на величину $0,56 - 0,45 = 0,11$, поэтому замена площади 73 м^2 материалом №811 приведет к возрастанию перебора единиц звукопоглощения на величину $\Delta A_{500} = 0,11 \cdot 73 = 8$. Для того, чтобы обеспечить наиболее равномерное отклонение полученных значений A от среднего требуемого значения $A_{\text{доб.ср.}}$, достаточно заменить поглотителем №811 площадь, равную $\Delta S = 30 \text{ м}^2$. Соответствующие изменения отражены в табл. 16. Полученное в результате расчета число единиц звукопоглощения представлены в строке «Всего» табл. 16.

В предпоследней строке табл. 16 приведены допустимые пределы, в которых должно находиться фактически полученное A_c число единиц звукопоглощения (по данным табл. 15) специальных абсорбентов. Как видно из последней строки табл. 16, эти требования выполнены (рис. 13).

Методика подбора изложена подробно, так как она может служить основой для расчета студий и других помещений на реверберацию.

4.4. Расчет времени стандартной реверберации

Полученные результаты позволяют вычислить частотную зависимость стандартной реверберации, используя формулу (1), которую целесообразнее написать в виде:

$$T = \frac{0,07 \cdot V}{4 \cdot \delta \cdot V - S \cdot \lg \left(1 - \frac{A}{S} \right)} \quad (18)$$

где A – общее число единиц звукопоглощения, вносимых основным, специальным и дополнительным фондом абсорбентов; S – суммарная площадь всех поверхностей помещения.

Для приведенного примера результаты вычислений сведены в табл. 17 (при $V = 900 \text{ м}^3$; $S = 600 \text{ м}^2$; $0,07V = 8,4 \text{ м}^3$).

По вычисленным величинам построена частотная характеристика стандартной реверберации, графически изображенная на рис. 15.

Таблица 17

Пример расчета времени стандартной реверберации

F , Гц	125	250	500	1000	2000	4000
A	218,92	214,43	219,28	195,17	202,94	193,47
A/S	0,365	0,357	0,365	0,325	0,338	0,322
$1 - A/S$	0,635	0,643	0,635	0,675	0,662	0,678
$\lg(1 - A/S)$	-0,197	-0,192	-0,198	-0,171	-0,179	-0,169
$-S \cdot \lg(1 - A/S)$	118,28	115,23	118,53	102,52	107,58	101,43
$0,4 \cdot \delta \cdot V$	0	0	0,36	1,08	3,60	10,80
T , с	0,53	0,55	0,53	0,61	0,57	0,56

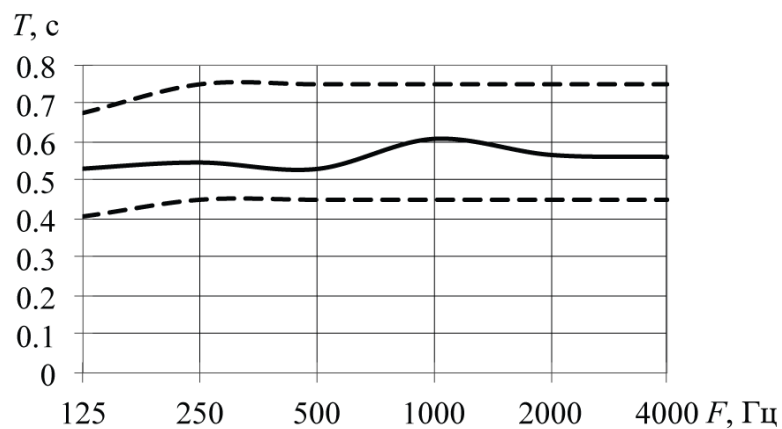


Рис. 15. Частотная зависимость полученного в результате расчета времени реверберации (сплошная кривая) и допустимые отклонения (пунктир)

В табл. 18 указаны типы примененных в рассмотренном примере специальных (и дополнительных) звукопоглощающих материалов, которые взяты из приведенного в табл. 4 перечня и табл. 5, а также занимаемая ими площадь.

Таблица 18

Типы примененных звукопоглощающих материалов

№	№ абсорбента	Материал	Площадь, м ²
1	68	толстые деревянные панели	48,5
2	722	стекловолокно, $h = 30$ мм	182,5
3	762	перфорированная фанера с поглотителем из минеральной ваты $d = 4$ мм, $D = 40$ мм, $a_1 = 200$ мм, $a_2 = 100$ мм	180,0
4	811	перфорированные древесноволокнистые плиты $p = 15$ мм, $q = 20$ мм, $Q = 2 \cdot 56$ мм ² , $a_1 = 0$ мм, $a_2 = 0$ мм	30,0
Итого:			441,0

Таблицы 13–18 составляются при расчете студии на реверберацию и отображают содержание соответствующего раздела курсового проекта (с необходимыми пояснениями). Примеры расположения звукопоглощающих материалов были приведены на рис. 8–10.

4.5. Расчет звукоизоляции студийного помещения

Ниже приведен пример расчета звукоизоляции от «воздушных» шумов ранее рассмотренной студии. План расположения смежных помещений и основные размеры в метрах показаны на рис. 16. Высота студии 6 м, а общее число единиц звукопоглощения $\alpha S = 207$, при этом $S = 600 \text{ м}^2$.

Допустимый уровень «воздушных» шумов в студии $N_0 = 25 \text{ дБ}$.

Все предварительные данные – вид преграды, с каким помещением она граничит, ее линейные размеры и площадь S_k занесены в табл. 19.

Заметим, что площадь смотрового окна между студией и студийной аппаратной в больших студиях берется порядка 3 м^2 , а в малых – порядка $1,5 \text{ м}^2$. Для лучшего обозрения студии взята площадь окна 3 м^2 . Графа N_k заполняется по данным табл. 11.

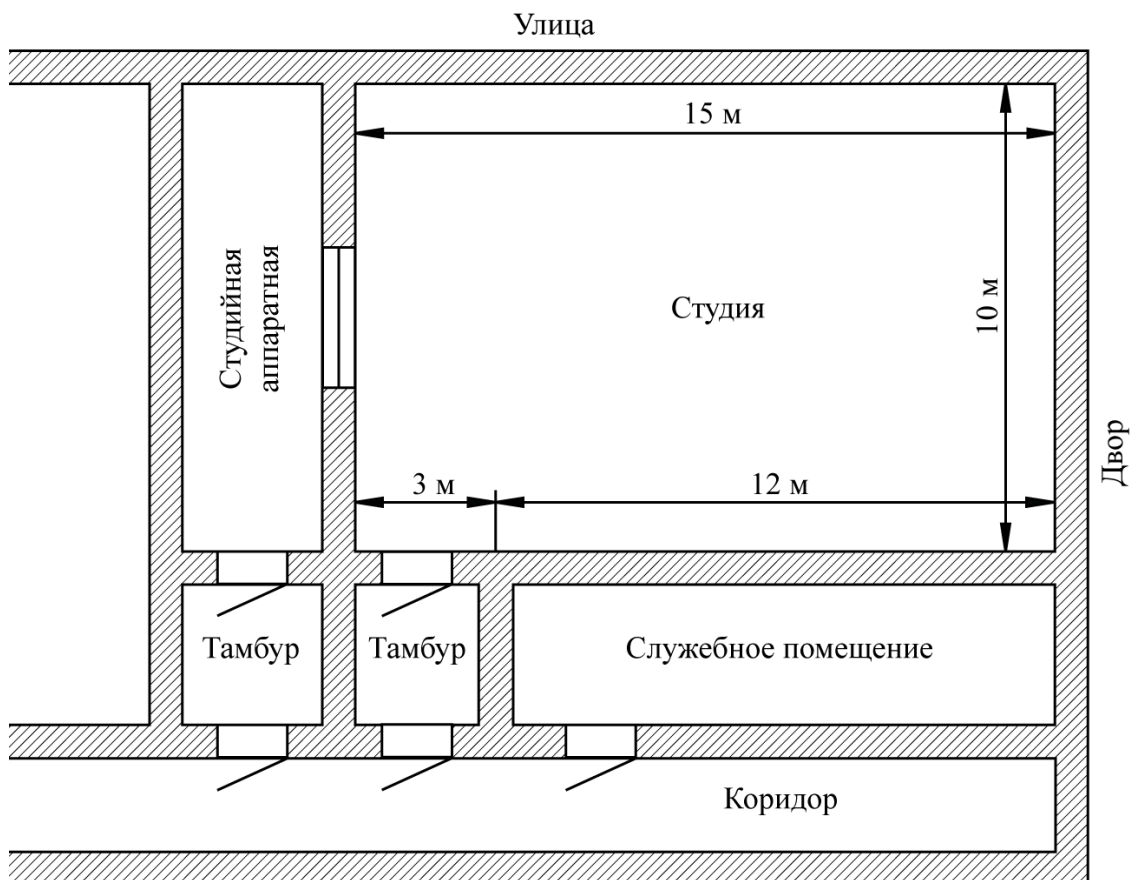


Рис. 16. План расположения смежных со студией помещений

Таблица 19

Пример расчета звукоизоляции от воздушных шумов для речевой студии

№	Вид преграды	С чем граничит	Линейные размеры	S_k , м ²	N_k , дБ	Требуется σ_k , дБ	Выбранная конструкция	σ_k , дБ	$0,23 \cdot (N_k - \sigma_k)$	$\exp[0,23 \cdot (N_k - \sigma_k)]$	$S_k \cdot \exp[0,23 \cdot (N_k - \sigma_k)]$		
1	Стена	Студийная аппаратная	(10·6) – 3	57	85	64	Кирпичная оштукатуренная стена, толщина 920 мм	64,5	4,72	111,6	6362		
2	Смотровое окно	Студийная аппаратная	3·1	3	85	52	Трехстекольное окно (стекла разной толщины)	55	6,90	992,3	2977		
3	Стена	Улица	15·6	90	90	71	Кирпичная оштукатуренная стена, толщина 920 мм	64,5	5,87	352,5	31723		
4	Дверь	Тамбур	1.5·2	3	50	17	Дверь с прокладкой	29	4,83	125,2	376		
5	Стена	Тамбур	(3·6) – 3	15	50	24	Кирпичная оштукатуренная стена, толщина 140 мм	47	0,69	2,0	30		
5	Стена	Служебное помещение	12·6	72	60	40	Кирпичная оштукатуренная стена, толщина 140 мм	47	2,99	19,9	1432		
6	Стена	Двор	10·6	60	70	50	Кирпичная оштукатуренная стена, толщина 270 мм	53	3,91	49,90	2994		
7	Пол	Подвал	15·10	150	60	44	Междуэтажное перекрытие, типовое, с воздушным промежутком	55	1,15	3,20	474		
8	Потолок	Служебное помещение	15·10	150	80	64	Междуэтажное перекрытие, типовое, с воздушным промежутком, акустически обработанное	65	3,45	31,5	4725		
Итого:				600								Итого:	51092

Учитывая, что студия невелика, задаем уровень шума от работы вентиляционных устройств $N_B = 15$ дБ. Тогда $\exp(0,23 \cdot 15) = \exp(3,45) = 31,5$. Так как $N_0 = 25$ дБ, то $\exp(0,23 \cdot 25) = \exp(5,75) = 314,2$. Следовательно, по левой части формулы (16) имеем $(314,2 - 31,5) \cdot 207 = 58517 = N$ – требуемая сумма девяти слагаемых табл. 19. Средняя величина каждого слагаемого $N/n = 6502$.

Теперь можно вычислить требуемую величину коэффициента звукоизоляции для каждой преграды по формуле (17), так как $n = 9$.

Заметим, что в табл. 12 нет данных для стены, коэффициент звукоизоляции которой был бы равен 71 дБ, как это требуется для стены, разделяющей студию и улицу с интенсивным движением. Поэтому следует обратиться к формуле (11), из которой можно найти величину Q . Так как $71 = 21,51 \cdot \lg Q - 4$, то $\lg Q = 3,49$, откуда $Q = 3067$. Соответствующую толщину Δ ординарной кирпичной стены можно определить по формуле (12): $\Delta = 0,59 \cdot 3067 = 1810$ мм.

Толщина стены свыше 1 м слишком велика. Поэтому можно взять стену с воздушным промежутком или решить вопрос о конструкции данной стены после подсчета остальных слагаемых. Рассмотрим последний вариант. Коэффициент звукоизоляции, требуемый для смотрового окна $\sigma = 53$ дБ, поэтому выберем трехстекольное смотровое окно с максимально возможным значением $\sigma = 55$ дБ.

Если полученное в последней графе табл. 19 слагаемое превышает ранее вычисленную среднюю величину (6502), то следует по возможности уменьшать остальные слагаемые. Если выбираемая конструкция имеет коэффициент звукоизоляции $\sigma_k > N_k$, то через такую преграду помехи не проникают. Данное условие относится к стене, граничащей с тамбуром и служебным помещением. Подобрал по величине требуемого коэффициента звукоизоляции конструкции всех преград (по табл. 12), получим сумму 8-ми слагаемых (кроме третьего) равную 19369. Тогда третье слагаемое должно быть $58517 - 19369 = S_k \cdot \exp[0,23(N_k - \sigma_k)]$, а следовательно, в соответствии с (18) имеем

$$\sigma_k = 90 - 10 \cdot \lg 39148 + 10 \cdot \lg 90 = 64.$$

Таким образом, оказалось достаточным применить кирпичную стену толщиной 920 мм (табл. 12), $\sigma = 64,5$.

Были приведены все рассуждения, позволяющие наиболее рационально выбрать конструкции всех преград. Фактически полученная сумма всех слагаемых равна 51092, т.е. несколько меньше ранее вычисленной $N = 58517$. Общий уровень помех находится по левой части выражения (17), так как $\exp(0,23N_0) - \exp(0,23 \cdot 15) = 51092/207$, откуда $N_0 = 24,5$ дБ.

Значительно уменьшать уровень помех по сравнению с заданным не рационально, так как это вызовет повышение стоимости строительства студии.

4.6. Построение и анализ трехмерной модели студийного помещения

В соответствии с методикой, изложенной в приложениях 1–3, с помощью программы **Ulysses** было выполнено построение трехмерной модели помещения, рассмотренного в данном примере, размещение на внутренних поверхностях помещения подобранны в пп. 4.2–4.3 звукопоглощающих материалов и конструкций, а также произведен анализ стандартного времени реверберации в полученном помещении в соответствии с заданием, изложенным в разделе 3.

Трехмерная проекция смоделированного помещения представлена на рис. 17.

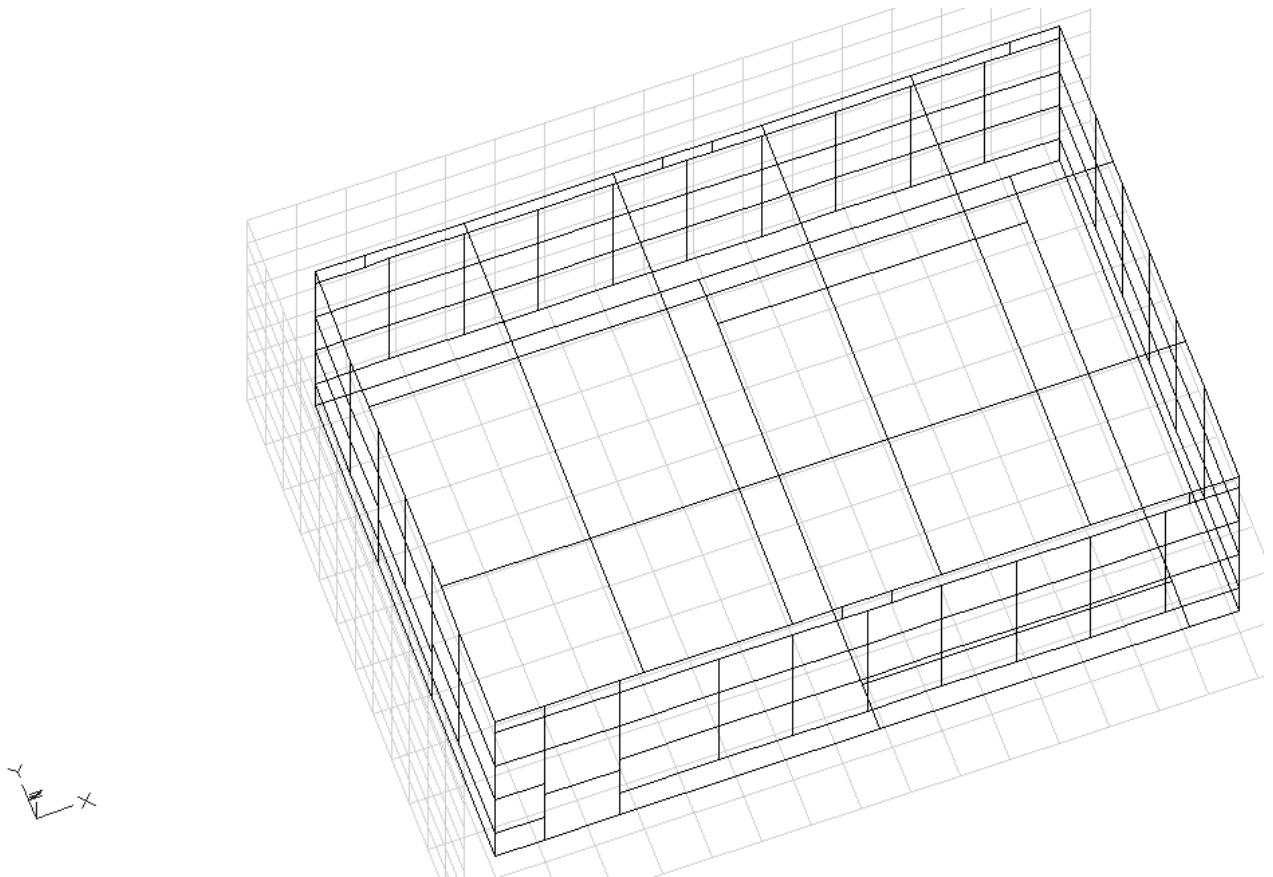


Рис. 17. Модель студийного помещения, построенная с помощью программы **Ulysses**

Результаты анализа времени стандартной реверберации приведены в табл. 20. Как было отмечено ранее, в связи с невозможностью размещения в компьютерной модели некоторых элементов основного фонда звукопоглощения, например, таких как исполнители, стулья или декорации, ре-

зультат расчета времени реверберации несколько отличается от полученного в результате теоретических расчетов, однако, погрешность не превышает 30 мс. Наглядно погрешность расчета и измерения времени стандартной реверберации представлены на графике на рис. 18.

Для проведения анализа зависимости времени стандартной реверберации от заполненности помещения исполнителями и слушателями, на полу помещения были размещены две поверхности:

– зона для размещения десяти исполнителей, площадью $10 \cdot 0,7 = 7 \text{ м}^2$, размещенная в области, занимаемой ковром. В качестве поглощающего материала (табл. 9) выбраны стулья (свободные, занятые на 2/3, занятые полностью); материалы №202, 200, 201 соответственно;

– зона для размещения 75 слушателей, площадью $75 \cdot 0,7 = 52,5 \text{ м}^2$, размещенная в области, занимаемой линолеумом. В качестве поглощающего материала (табл. 9) выбраны деревянные театральные сиденья (свободные, занятые на 2/3, занятые полностью); материалы №224, 223, 225 соответственно.

Результаты измерения времени стандартной реверберации в случае различной заполненности помещения исполнителями и слушателями (для каждого из трех экспериментов заполненность принималась одинаковой для исполнителей и слушателей) представлены в табл. 20. По графикам на рис. 19 наглядно видно, что в случае полной заполненности помещения, время стандартной реверберации уменьшается, причем более значительно на высоких частотах.

Таблица 20

Пример результатов анализа времени стандартной реверберации

	T, с					
	125Гц	250Гц	500Гц	1000Гц	2000Гц	4000Гц
Теоретический расчет	0,53	0,55	0,53	0,61	0,57	0,56
Результат моделирования, без учета размещения исполнителей и/или слушателей	0,55	0,55	0,50	0,58	0,57	0,55
Результат моделирования, с размещением 10 пустых стульев для исполнителей и 75 пустых кресел для слушателей	0,55	0,57	0,56	0,65	0,61	0,69
Результат моделирования, с размещением 10 стульев и 75 кресел, занятых на 2/3	0,50	0,54	0,51	0,55	0,52	0,51
Результат моделирования, с размещением 10 стульев и 75 кресел, полностью занятых	0,47	0,52	0,49	0,51	0,48	0,47

При проектировании любого студийного или концертного помещения, предполагающего наличие большого числа исполнителей и/или слушателей, необходимо проводить подробный анализ зависимости времени стандартной реверберации от заполненности помещения, с тем, чтобы обеспечить наилучшее качество звучания речевых, музыкальных или театральных программ в любых условиях исполнения или воспроизведения.

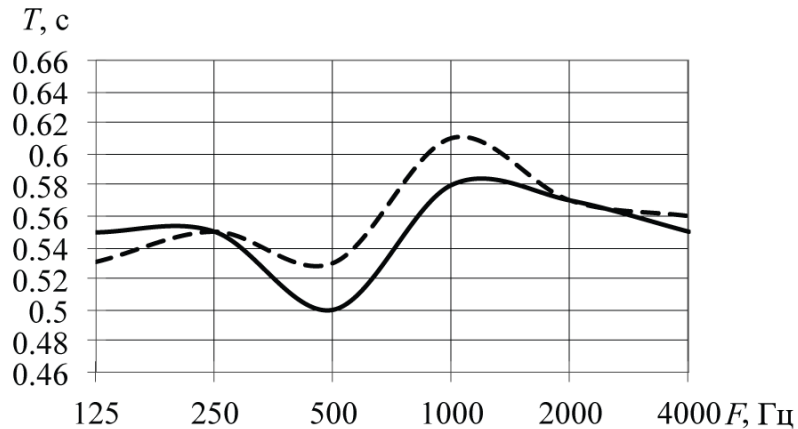


Рис. 18. Теоретическая (пунктир) и экспериментально полученная (сплошная линия) зависимость времени стандартной реверберации в исследуемом помещении.

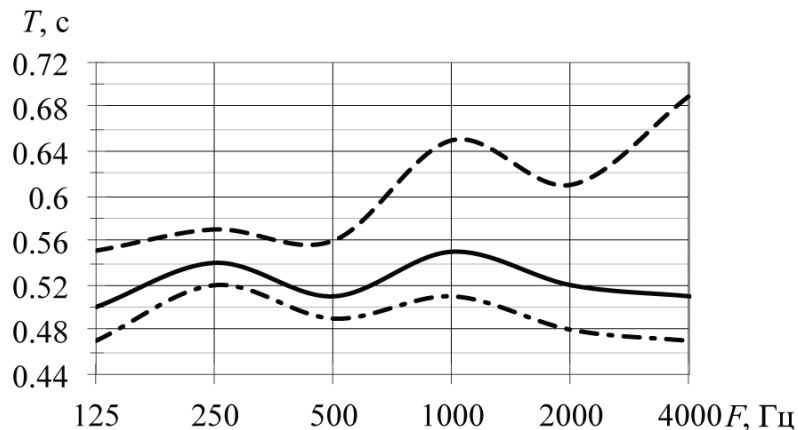


Рис. 19. Зависимость времени стандартной реверберации от заполняемости помещения исполнителями и слушателями: свободное помещение (длинный пунктир); заполненное на 2/3 (сплошная линия); полностью заполненное (точка-тире).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Курсовой проект должен содержать (в скобках приводятся примеры соответствующих таблиц и/или рисунков):

1. Задание на проектирование и акустический расчет помещения в соответствии с данными табл. 1;

2. Расчет требуемой частотной характеристики времени стандартной реверберации помещения (табл. 13–14, рис. 13–14);

3. Расчет звукопоглощения, вносимого основным фондом (табл. 15);

4. Расчет звукопоглощения, вносимого специальными материалами и конструкциями, с подробным обоснованием выбора того или иного звукопоглощающего материала (табл. 16);

5. Расчет времени стандартной реверберации (табл. 17, рис. 15);

6. Перечень примененных специальных звукопоглощающих материалов (табл. 18);

7. План расположения смежных со студией помещений (рис. 16);

8. Расчет звукоизоляции студийного помещения с подробным обоснованием выбора тех или иных звукоизоляционных конструкций (табл. 19).

После построения модели помещения в программной среде **Ulysses** и размещения в ней всех выбранных по результатам акустического расчета звукопоглощающих материалов, в соответствующих разделах курсового проекта следует привести.

9. Аксонометрическую проекцию и проекции на плоскости XY , XZ и YZ построенной модели помещения: а) после размещения элементов звукопоглощения основного фонда (рис. П.2.9–П.2.12); б) после размещения специальных звукопоглощающих материалов (рис. П.2.14);

10. Для каждого использованного материала (включая материалы, относящиеся к основному фонду звукопоглощения): общее количество вносимых единиц звукопоглощения, общую занимаемую площадь (блок **Absorber Material** в окне **Face Listing**);

11. Общее количество полученных в результате моделирования единиц звукопоглощения (блок **Absorbtion Total** в окне **Face Listing**);

12. Результат анализа частотной характеристики времени стандартной реверберации в построенной модели помещения и сравнение его с результатами теоретического расчета (табл. 20, рис. 18);

13. Результат анализа зависимости частотной характеристики времени стандартной реверберации от заполненности помещения исполнителями и/или слушателями (табл. 20, рис. 19).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов / И. А. Алдошина, Э. И. Вологдин, А. П. Ефимов, Г. П. Катунин, Л. Н. Кацнельсон, Ю. А. Ковалгин, А. А. Фадеев; Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком, Радио и связь, 2007. – 872 с.; ил.
2. Акустика: Учебник для вузов / Ю. А. Ковалгин, А. А. Фадеев, Ю. П. Щевьев; Под ред. профессора Ю.А.Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 660 с.
3. *Щевьев, Ю. П.*, Осташевский Е. Н. Средства акустической обработки помещений: Учебное пособие. – СПб.: ООО «Типография «Береста», 2010. – 328 с.; ил.
4. Акустика: Справочник / Под ред. М. А. Сапожкова, – М.: Радио и связь, 1989.
5. Звуковое вещание: Справочник / Под ред. Ю. А. Ковалгина. – М.: Радио и связь, 1993.
6. *Маньковский, В. С.* Акустика студий и залов для звуковоспроизведения, – М.: Искусство, 1966.
7. Проектирование театров. Справочное пособие к СНиП 2.08.02-89. Общественные здания и сооружения / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 40 с.
8. <http://www.ifbcon.de/software/ulysses/e.php>
9. <https://www.virtualbox.org>
10. <http://www.munro.co.uk/>

ПРОГРАММНАЯ СРЕДА ULYSSES

Программное обеспечение **Ulysses** представляет собой среду, позволяющую выполнять трехмерное моделирование и акустическую обработку помещения, систем озвучения и звукоусиления, а также анализ звукового поля в исследуемом помещении. Она состоит из одного основного и трех дополнительных модулей:

- **Design Engine** является основной программой, в которой выполняется моделирование помещения, размещение акустических систем и расчет акустических характеристик. Для работы с этим модулем требуется наличие баз данных звукопоглощающих материалов и громкоговорителей;

- **Absorber Base** позволяет просматривать и редактировать информацию о звукопоглощающих материалах;

- **Speaker Builder** позволяет просматривать информацию о громкоговорителях;

- **Ulysses Viewer** позволяет просматривать, копировать и распечатывать результаты расчетов, выполненных в модуле **Design Engine**.

Для ознакомления и получения начальных навыков работы с **UlyssesDesign Engine** существует бесплатная демо-версия программы, которая доступна для скачивания на сайте разработчиков в разделе **Software – UlyssesDownloads – Program**:

http://www.ifbsoft.de/software/ulysses/downloads/setup/e_ul_282.exe

Демо-версия предоставляет возможность использования всех имеющихся в программе функций, и может быть использована для выполнения данного курсового проекта, однако, в качестве ограничения, не позволяет сохранять создаваемые проекты.

Для более комфортной работы с программой студентам рекомендуется реализовать использование функции сохранения с помощью установки программной среды **Ulysses** в виртуальную машину, например, с помощью бесплатного программного пакета **Oracle Virtual Box**:

<https://www.virtualbox.org/>

с установленной в ней операционной системой **Windows**. Виртуальная машина позволит сохранить работу на любом этапе выполнения, сделать резервную копию или просто работать над одним и тем же проектом в течение длительного времени.

В приложениях 2–3 будут подробно рассмотрены основные этапы работы с программой.

При разработке методических указаний была использована версия **UlyssesDesign Engine 2.82**.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПОМЕЩЕНИЯ

Рассмотрим построение простой модели помещения в форме параллелепипеда в программной среде **Ulysses Design Engine**. Выберите в режиме отображения плоскость XY . С помощью пункта меню **Room – Draw – Rectangle** нарисуйте прямоугольник, являющийся полом моделируемого помещения. Размерами прямоугольника являются заданные длина l и ширина b исследуемого помещения. Далее будет рассматриваться пример моделирования помещения, имеющего длину 15 м, ширину 10 м и высоту 6 м. В нижней части экрана в строке ввода данных появится запрос введения координат исходной точки: **RECTANGLE > 1.Point :**. Для более удобного отображения модели при построении прямоугольника исходной точкой задайте точку с координатами (0,0,0) (рис. П.2.1), при этом конечная точка прямоугольника будет иметь координаты (15,10,0) (рис. П.2.2); для этого можно воспользоваться абсолютным способом задания координат, диалоговое окно которого вызывается нажатием на клавиатуре английской буквы «a». Полученный в результате построения прямоугольник представлен на рис. П.2.3.

Во избежание появления ошибок при соединении плоскостей, образующих помещение, дальнейшее построение модели выполните с помощью команды **Extrude**, которая образует параллелепипед из прямоугольника путем «выдавливания» его на заданную высоту h . Для этого включите в режиме отображения плоскость XZ или YZ , выберите пункт меню **Room – Edit – Extrude**, после чего курсором выделите полученный ранее прямоугольник, который будет подсвечен красной пунктирной линией (рис. П.2.4); подтвердите выбор объекта нажатием клавиши **Enter** или кнопки **Ok** в нижней части экрана; задайте абсолютные значения координат опорной точки (**base point**): (0,0,0) (рис. П.2.5), а также точки сдвига (**offset point**), которая будет иметь координаты (0,0, h) (рис. П.2.6). Полученный в результате построения параллелепипед представлен на рис. П.2.7.

Для построения внутренних элементов помещения (дверей, окон и пр.), а также для размещения на различных участках внутренних поверхностей различных звукопоглощающих материалов, следует воспользоваться функцией разбиения поверхностей, доступной в меню **Room – Edit – Split Face**. Рассмотрим использование этой функции на примере размещения в моделируемом помещении элементов основного фонда звукопоглощения (дверь, окно в студию, аппаратную, вентиляционные решетки, ковер).

В рассматриваемом примере выполним построение одной двери площадью 3 м^2 , расположенной на длинной стене помещения, и представляющей собой прямоугольник со сторонами 1,5 м и 2 м.

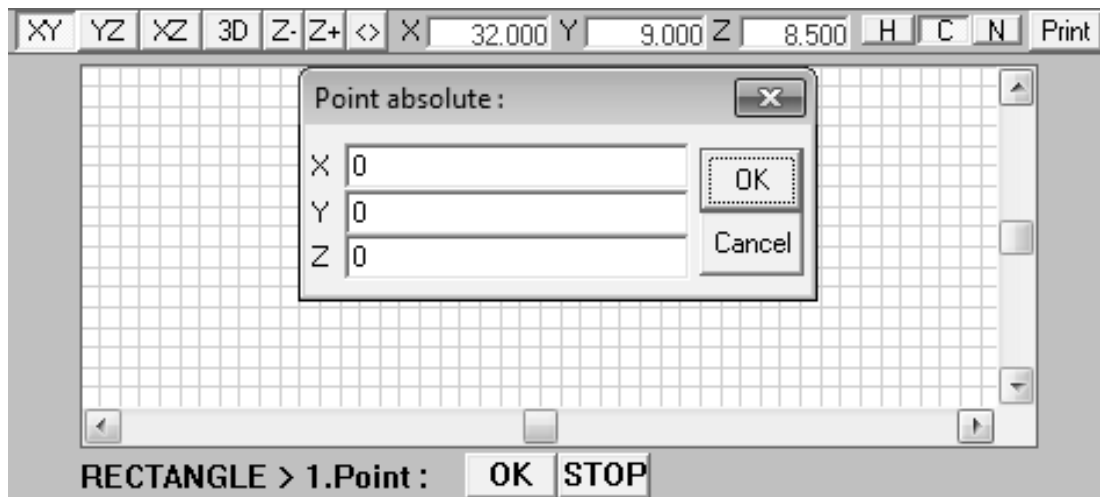


Рис. П.2.1. Задание координат исходной точки для построения прямоугольника.

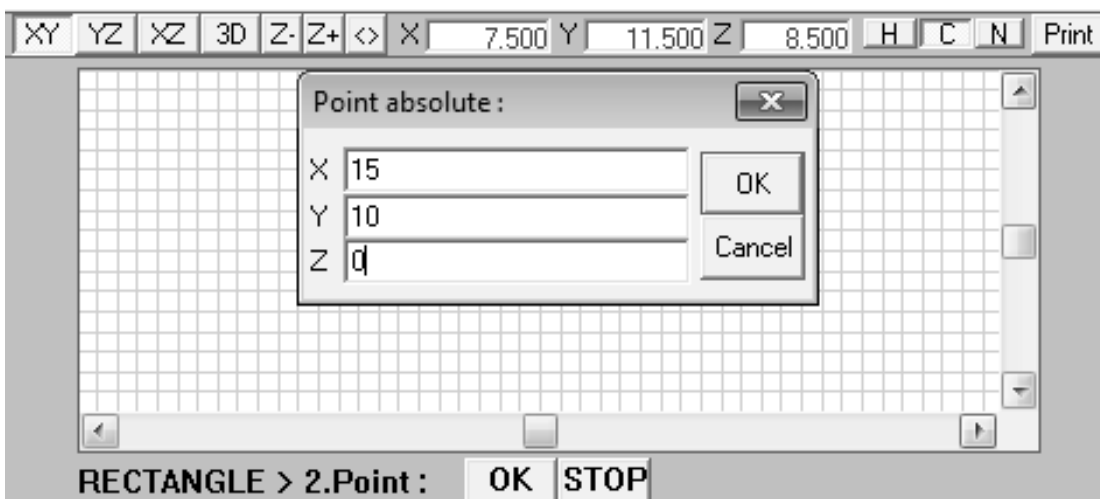


Рис. П.2.2. Задание координат конечной точки для построения прямоугольника.

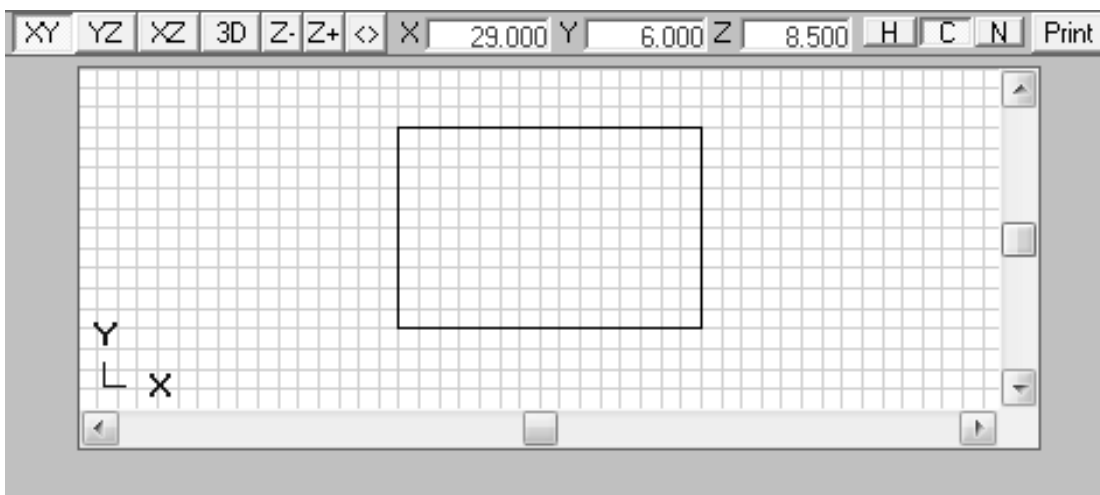


Рис. П.2.3. Полученный в результате построения прямоугольник.

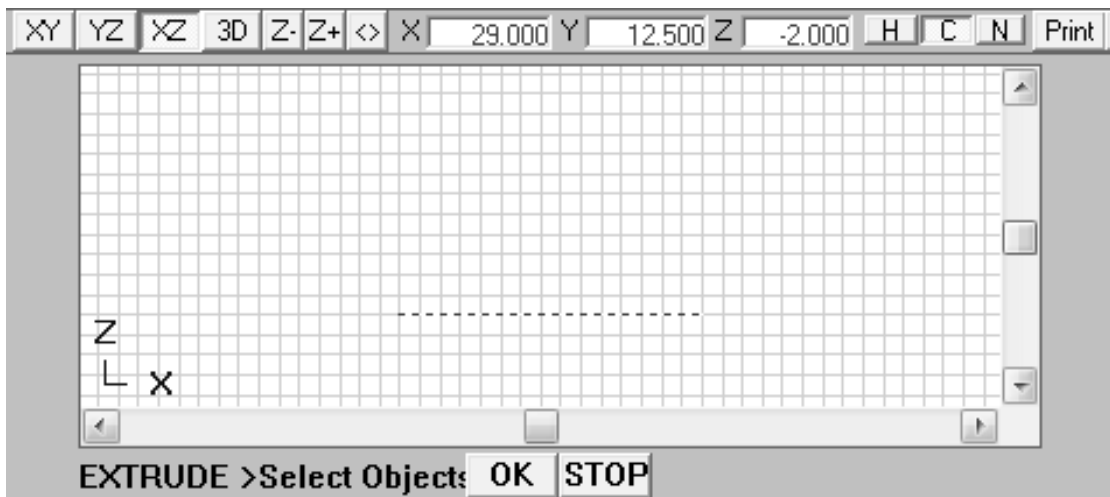


Рис. П.2.4. Выбор поверхности для выдавливания.

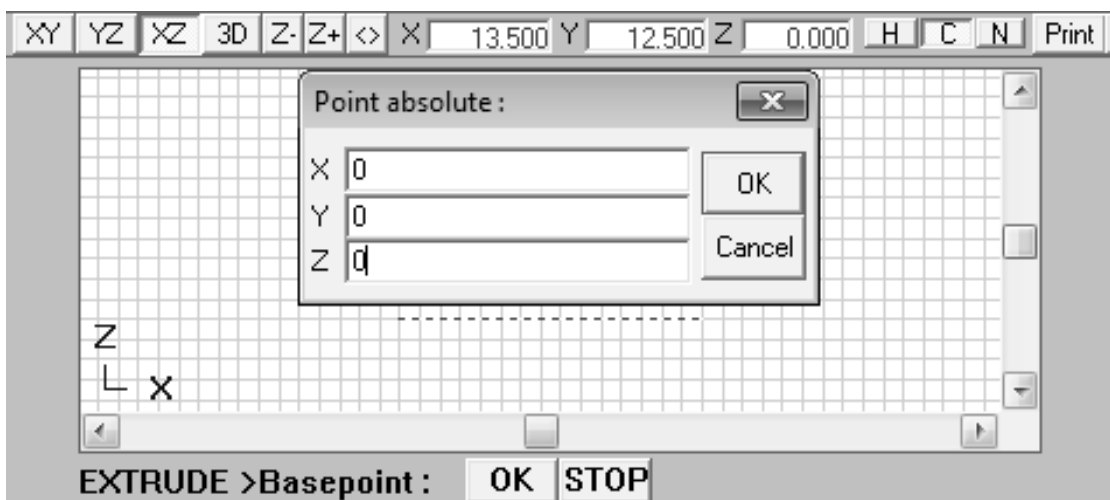


Рис. П.2.5. Задание опорной точки.

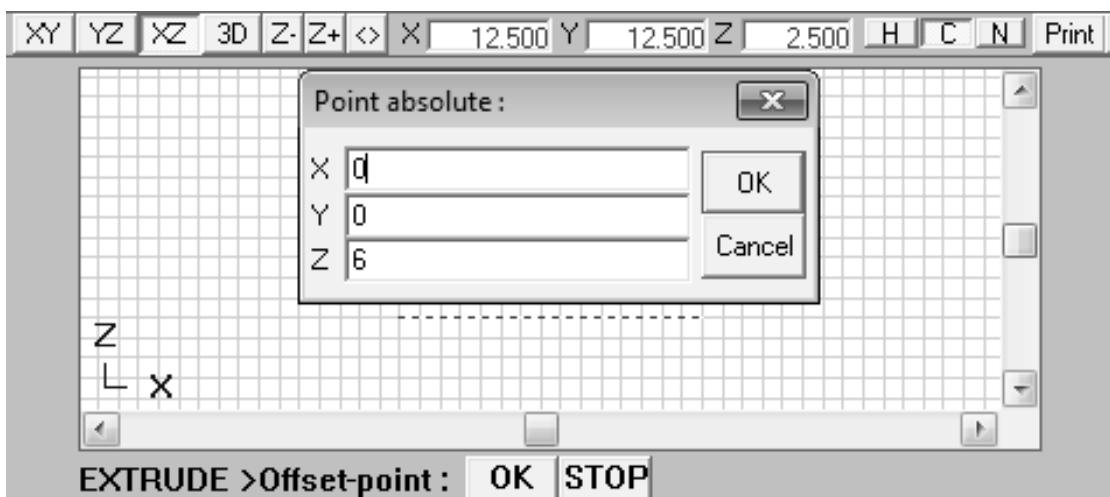


Рис. П.2.6. Задание точки смещения.

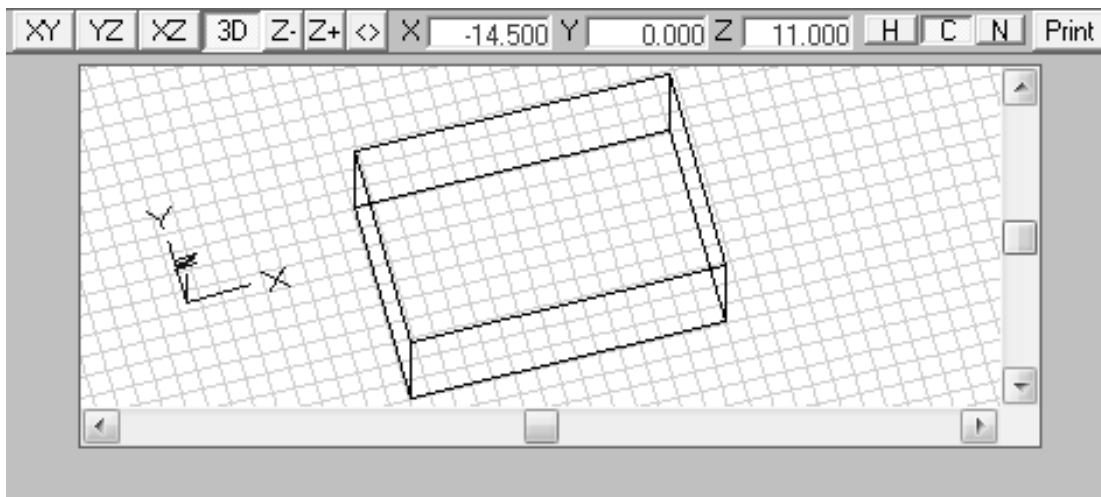


Рис. П.2.7. Полученный параллелепипед.

Для выполнения такого построения потребуется разбить поверхность всей стены на четыре прямоугольных участка путем выполнения трех последовательных операций разбиения поверхности надвое с помощью прямой линии. Пусть дверь будет расположена на расстоянии 1 м от угла помещения, имеющего координаты (0;0;0), таким образом, первая из четырех вершин прямоугольника, образующего дверь, будет иметь координаты (1;0;0). Соответственно, три другие вершины прямоугольника будут иметь координаты (1;0;2), (2,5;0;2), (2,5;0;0).

Для выполнения операции разбиения поверхности выберите пункт меню **Room – Edit – Split Face**; в любом удобном режиме отображения выберите разбиваемую поверхность (она будет подсвечена красной пунктирной линией) и подтвердите выбор нажатием клавиши **Enter** или кнопки **Ok** в нижней части экрана; затем задайте абсолютные значения координат двух точек, через которые пройдет прямая, разбивающая поверхность. В рассматриваемом примере эти две точки имеют координаты (1;0;0) и (1;0;6). Полученные в результате разбиения поверхности представлены на рис. П.2.8.

Выполнив еще две операции разбиения, мы сможем получить прямоугольник требуемых размеров. Аналогичным образом выполните размещение окна в студийную аппаратную площадью 3 м², вентиляционных решеток (6 решеток площадью 0,5 м² каждая), а также ковра на полу, занимающего 1/3 общей площади пола помещения (50 м²). Полученная в результате построения модель помещения представлена на рис. П.2.9– П.2.12.

Для ускорения процедуры разбиения поверхностей можно воспользоваться геометрическим способом задания координат опорных точек, включив функцию смещения курсора и установив удобное значение шага смещения (**Options – Coordinate Snap**).

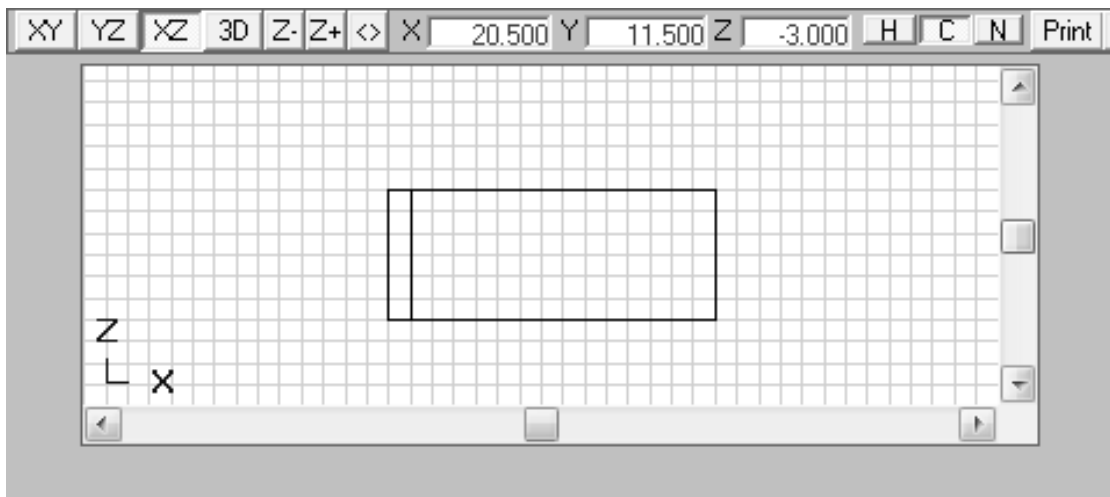


Рис. П.2.8. Поверхности, полученные после выполнения процедуры **Split Face**.

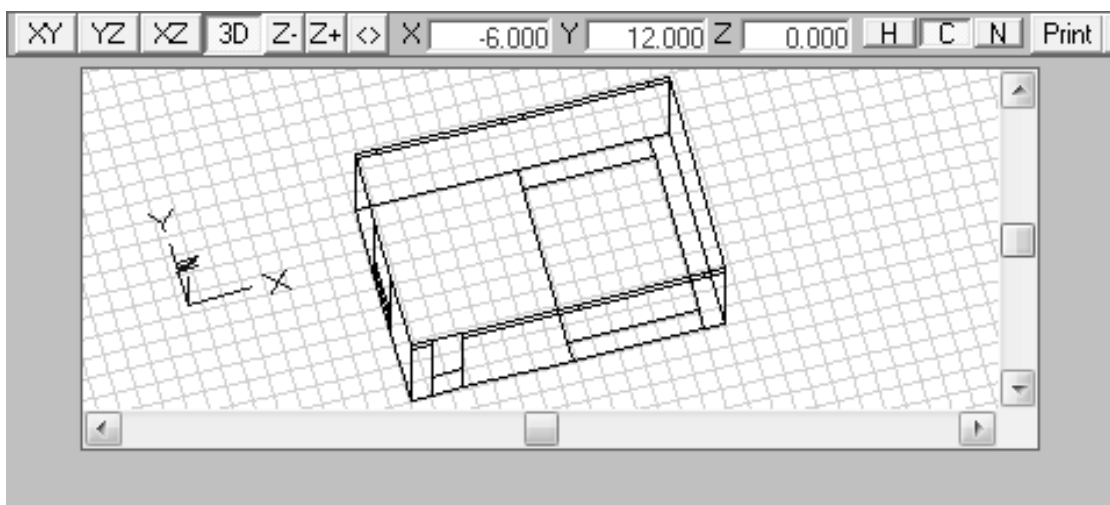


Рис. П.2.9. Размещение объектов основного фонда звукопоглощения (аксонометрическая проекция).

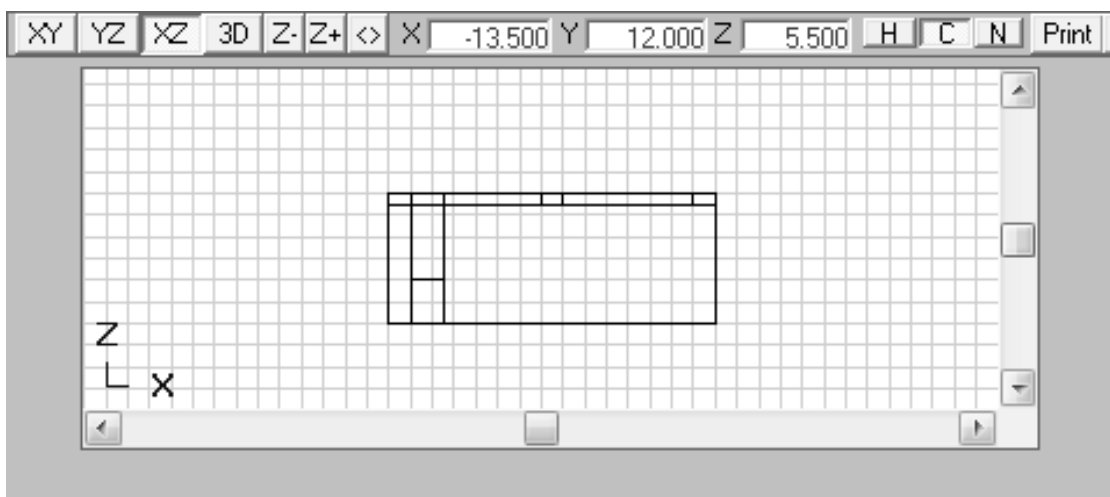


Рис. П.2.10. Размещение объектов основного фонда звукопоглощения (плоскость XZ).

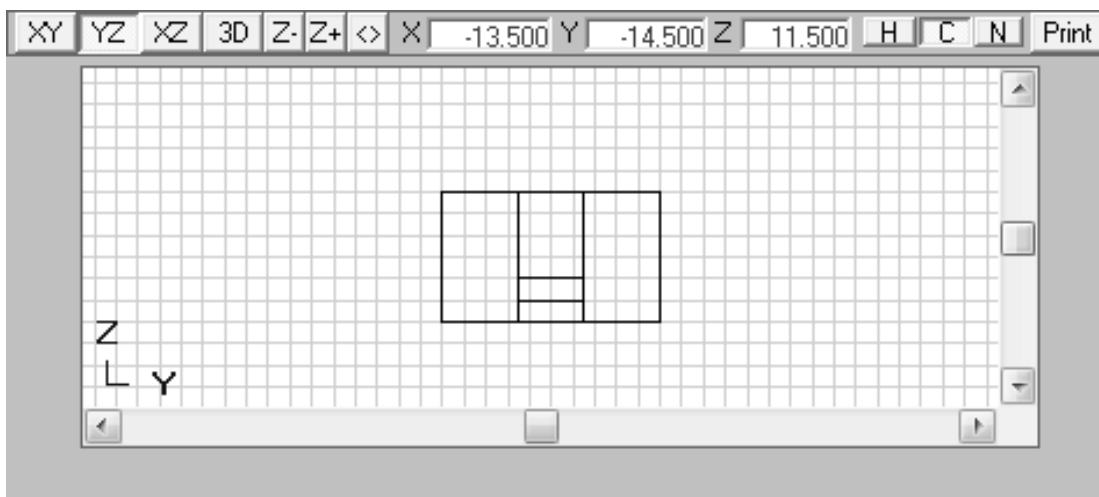


Рис. П.2.11. Размещение объектов основного фонда звукопоглощения (плоскость YZ).

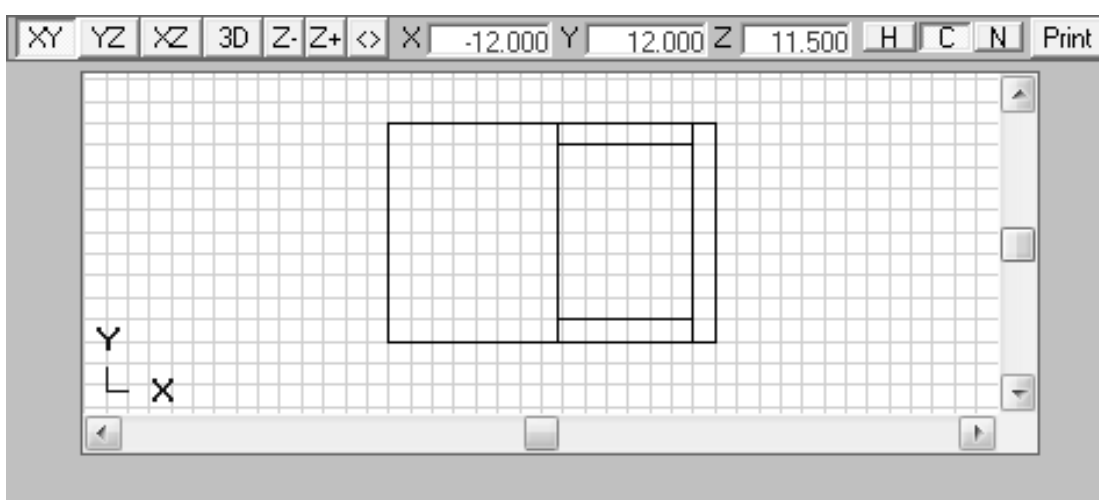


Рис. П.2.12. Размещение объектов основного фонда звукопоглощения (плоскость XY).

После завершения построения объектов основного фонда звукопоглощения необходимо присвоить вышеуказанным объектам соответствующие звукопоглощающие материалы. Для работы со звукопоглощающими материалами предварительно нужно указать программе путь к файлу, содержащему базу материалов. Базы звукопоглощающих материалов для программы **Ulysses Design Engine** можно найти на сайте разработчика в разделе **Software – Ulysses Downloads – Absorber Database**. При выполнении курсовой работы следует пользоваться базой **us_abs_values_b.zip**:

http://www.ifbsoft.de/software/ulysses/downloads/abs/us_abs_values_b.zip

В данном архиве содержатся четыре файла, каждый из которых включает в себя данные о следующих абсорбентах:

- USAbspart1.UAB – абсорбенты №1–433;
- USAbspart2.UAB – абсорбенты №400–813;
- USAbspart3.UAB – абсорбенты №900–938;
- USAbspart4.UAB – абсорбенты №1000–1182.

Полная таблица, содержащая расшифровку наименований материалов, а также численные значения коэффициентов звукопоглощения материалов, представлена в файле **usabsorptionvalues_b.xls**, который также можно найти в разделе **Absorber Database** на сайте разработчика:

http://www.ifbsoft.de/software/ulysses/downloads/abs/usabsorptionvalues_b.xls

Выбор файла с базой материалов производится с помощью пункта меню **Room – Select Material Database**, в диалоговом окне которого следует указать путь к нужному файлу с расширением ***.UAB**. Просмотреть выбранную базу материалов, их сокращенные и полные наименования, категорию и значения коэффициентов звукопоглощения, можно с помощью пункта меню **Room – Edit Database** (рис. П.2.13).

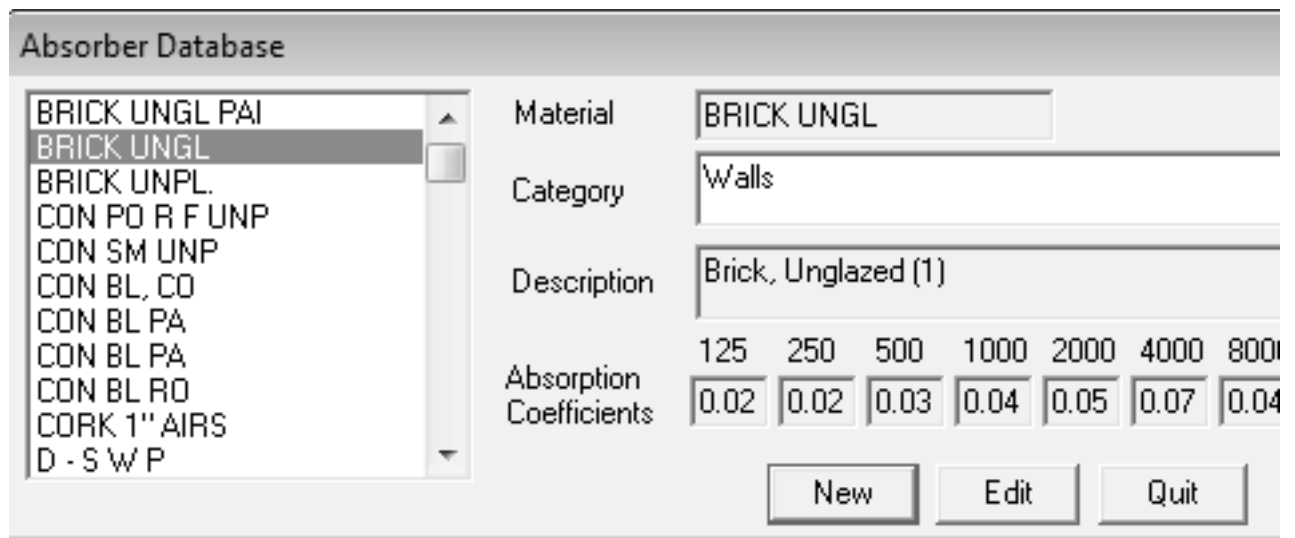


Рис. П.2.13. Выбор звукопоглощающих материалов

Для присвоения звукопоглощающего материала той или иной поверхности выберете пункт меню **Room – Assign Material**. В появившемся окне **Select Absorber Material** выберите требуемый звукопоглощающий материал (например, материал двери: №10 Дверь, монолитная деревянная (**Doors – solid wood panels**)) и подтвердите выбор нажатием клавиши **Enter** или кнопки **Ok**. Далее с помощью курсора в любом удобном режиме отображения выделите поверхность, которой необходимо присвоить данный материал, и подтвердите присвоение нажатием клавиши **Enter** или кнопки **Ok** в нижней части экрана. Следует отметить, что после присвоения материала для первой поверхности, программа остается в режиме присвоения данного материала, что позволяет сразу же присвоить тот или иной материал всем необходимым поверхностям, последовательно выделяя их курсором и подтверждая присвоение нажатием клавиши **Enter** или кнопки **Ok** в нижней части экрана. Для завершения работы с выбранным материалом нажмите клавишу **Esc** или кнопку **Stop** в нижней части экрана. Для выбора другого материала следует снова обратиться к пункту меню **Room – Assign Material**.

После присвоения ранее выбранных материалов объектам основного фонда звукопоглощения, разместите на оставшихся свободных поверхностях стен и потолка ранее выбранные специальные звукопоглощающие материалы и конструкции. Материалы и конструкции с разными акустическими характеристиками размещают по возможности равномерно на поверхностях студии, что способствует повышению диффузности звукового поля. Следует избегать размещения участков одного и того же материала на противоположных участках стен, т.к. это может привести к возникновению между ними стоячих волн. Одним из возможных решений данной проблемы является размещение материалов в шахматном порядке (рис. П.2.14). Размещение специальных материалов выполняется также с помощью использования функций **Split Face** и **Assign Material**.

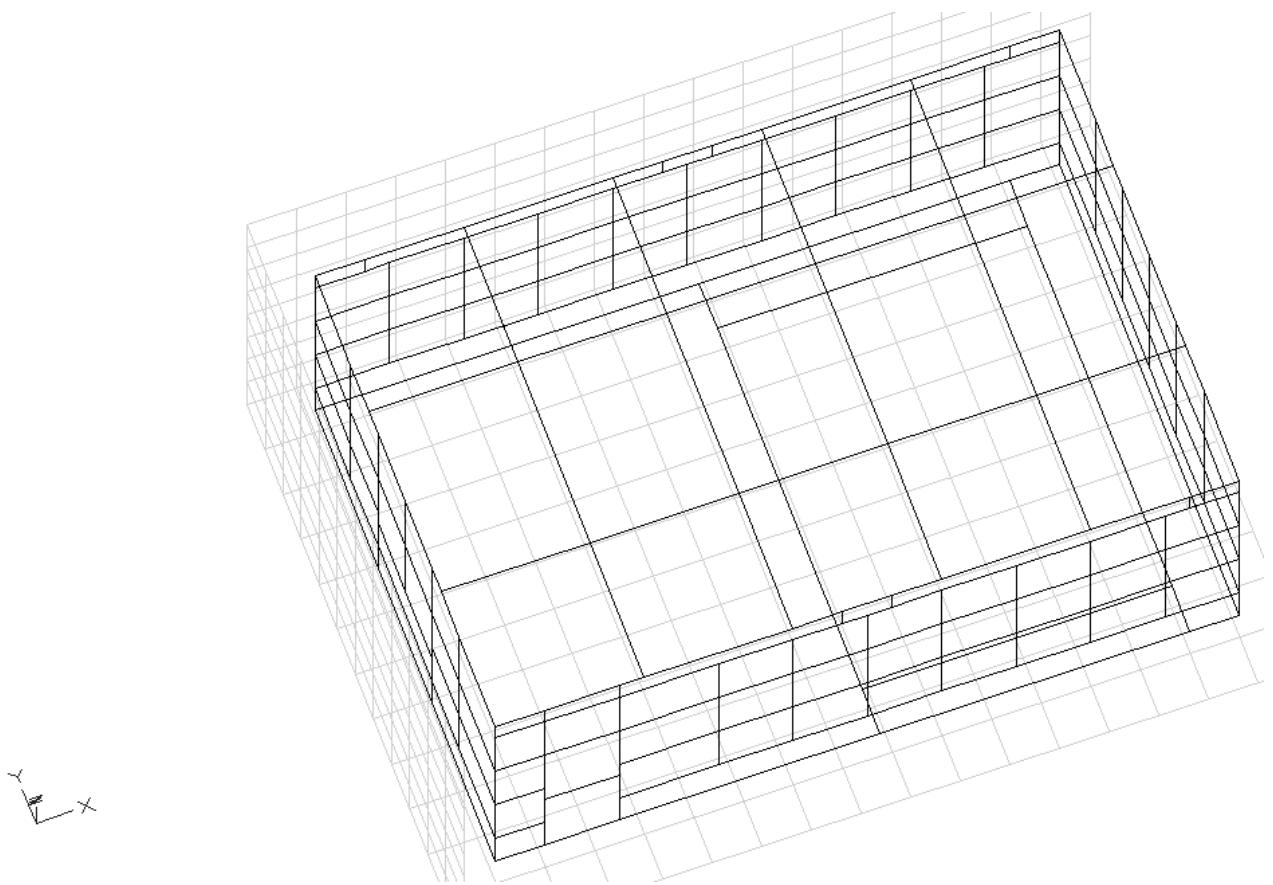


Рис. П.2.14. Размещение специальных звукопоглощающих материалов (аксонометрическая проекция).

После завершения работы полный список поверхностей моделируемого помещения можно посмотреть в меню **Room – Facelist** (рис. П.2.15). В появившемся диалоговом окне **Face Listing** будет содержаться информация о поверхностях, их площади, а также о присвоенном каждой поверхности материалу.

Диалоговое окно может быть развернуто в расширенный режим, в котором приводится подробная информация об использованном для каждой

поверхности материале, а также о количестве единиц звукопоглощения, вносимых выбранной поверхностью на каждой из расчетных частот (блок **Single Face**). В этом же блоке размещена кнопка **Change Face Material**, позволяющая произвести замену материала для выбранной поверхности, не выходя из диалогового окна **Face Listing**. В следующем блоке (**Absorber Material**) приводится информация о суммарной площади, которая облицована материалом выбранной поверхности (**Area**), и количестве единиц звукопоглощения, суммарно вносимых данным материалом на каждой из расчетных частот. С помощью расположенной в этом блоке кнопки **Replace Material** можно произвести замену материала для всех обработанных им поверхностей одновременно. В блоке **Absorption Total** приводится общее число единиц звукопоглощения, вносимых всеми используемыми материалами на расчетных частотах.

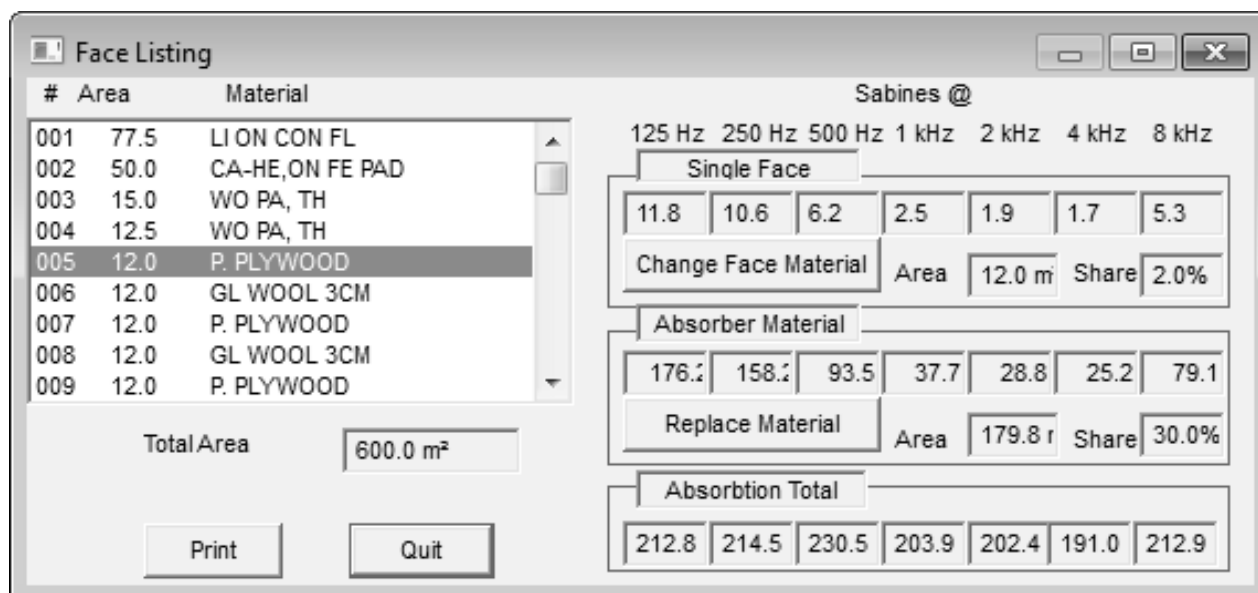


Рис. П.2.15. Список поверхностей смоделированного помещения

**Ковалгин Юрий Алексеевич
Свиньина Ольга Андреевна
Фадеев Александр Альфонсович**

**РАСЧЕТ АППАРАТНО-СТУДИЙНОГО КОМПЛЕКСА
ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИЯ И АУДИОТЕХНИКИ**

**Часть 1. Расчет акустического оформления
студий, театров и концертных залов**

**Методические указания
по курсовому проектированию**

*Редактор Л. А. Медведева
Верстка Н. А. Ефремовой*

План 2013 г., п. 83

Подписано к печати 26.11.2013
Объем 5,0 усл.-печ. л. Тираж 50 экз. Заказ 413

РИЦ СПбГУТ. 191186 СПб., наб. р. Мойки, 61

Отпечатано в СПбГУТ