

**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Полоцкий государственный университет»**



**СЕРИЯ «ИНТЕГРАТИВНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ»**

## **АРХИТЕКТУРНАЯ ФИЗИКА**

**РАЗДЕЛ «АРХИТЕКТУРНАЯ АКУСТИКА»**

**Методические указания и расчетные задания  
к курсовой работе для студентов специальности  
1-69 01 01 «Архитектура»**

**Новополоцк 2007**

УДК 721.011.2(075.8)

ББК 38.113я73

Одобрены и рекомендованы к изданию  
методической комиссией инженерно-строительного факультета

Кафедра физики

Кафедра архитектуры

Составители: Н. В. ОЩЕПКОВА, канд. техн. наук, доцент

А.Н. КАЧАНОВ, преподаватель-стажер

Рецензенты: В.А. ГРУЗДЕВ, д-р техн. наук, профессор

Г.И. ЗАХАРКИНА, канд. архитектуры, доцент

Содержат развернутые указания к выполнению курсовых работ по дисциплине  
«Архитектурная физика» (раздел «Архитектурная акустика»).

Предназначены для студентов 3 курса специальности 1-69 01 01 «Архитектура»  
инженерно-строительного факультета.

# 1. АРХИТЕКТУРНАЯ АКУСТИКА

## Учебная программа раздела

1. Звуковая среда в городах и зданиях. Основные понятия акустики. Закономерности распространения звуковых колебаний. Проблема реверберации.

2. Шумозащита и звукоизоляция в городах и зданиях. Источники шума и их характеристики. Нормирование шума. Звукоизоляция ограждений. Проектирование шумозащиты и звукоизоляции.

3. Акустика залов. Основные акустические характеристики залов. Оценка акустических качеств залов.

4. Общие принципы акустического проектирования залов. Залы для речевых программ. Учебные классы и аудитории. Залы с совмещением речевых и музыкальных программ.

## ТЕМА КУРСОВОЙ РАБОТЫ

### 1.1. ШУМОВОЙ РЕЖИМ ЗАСТРОЙКИ

#### *Литература и нормативные документы:*

1. СНиП 23-03-2003. Защита от шума. – М. : Стройиздат, 2003.
2. Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки / Минздрав РФ. – М., 1996.
3. Защита от шума в градостроительстве : справочник проектировщика / Под ред. Г. Л. Осипова. – М. : Стройиздат, 1993.
4. Шум города. Оценка и регулирование шумового режима селитебных территорий : Учеб. пособие / Н. П. Заборщикова, С. Пестрякова. – М. : Изд-во АСВ; СПб. : СПбГАСУ, 2004. – 112 с.
5. СНБ 3.01.04.02. Градостроительство. Планировка и застройка населенных пунктов. – Мн., 2003.

*Целью курсовой работы* по теме «Шумовой режим застройки» является расчет шумового фона жилой застройки и обоснованный выбор мероприятий по защите от шума внутриквартальной территории.

Источником шума является поток наземного автомобильного транспорта, который в настоящее время является основной причиной экологического дискомфорта в городах.

Шум, создаваемый городским автотранспортом, низко- и среднечастотный, с максимумом звукового давления в диапазоне частот 400 – 800 Гц, снижаясь в среднем на 4 – 5 дБ на октаву. Он имеет широкие спектральный диапазон и время звучания. Это является причиной глубины и мощности его негативного воздействия.

*Задачи курсовой работы:*

1. Расчет уровня шума от транспортных магистралей.
2. Расчет уровня шума в жилой застройке без учета зданий в узловых точках.
3. Расчет и построение звуковой тени от зданий на внутриквартальную застройку.
4. Определение снижения шума в узловых точках в пределах звуковых теней.
5. Расчет шумозащитных экранирующих элементов и определение комфортной зоны.

### **1.1.1. Выбор и обоснование метода определения акустических характеристик автотранспортных потоков**

Студенту предлагается ознакомиться с существующими методами оценки шума и обоснованно выбрать тот, которым воспользуется в курсовой работе [1 – 5].

Методы определения и оценки шума источников, действующих в городской среде и связанных с движением транспорта, установлены международным стандартом ISO 1996 «Акустика. Описание и измерение шума окружающей среды».

В настоящее время разработаны методы, которые позволяют устанавливать шумовые характеристики разнообразных источников городского шума. Это метод прямых натурных измерений (инструментальный), метод масштабного и математического моделирования (расчетный) и аналитический метод (графоаналитический), связанный с использованием детерминированных и вероятностных моделей и являющийся основой для прогнозирования.

Инструментальный метод предполагает получение в натуральных условиях шумовых характеристик рассматриваемых источников при помощи специализированных приборов (шумомеров) по жестко установленной методике. Этот метод принято считать наиболее точным и надежным, по-

сколькo определение параметров источника шума включает в себя учет многообразных природных условий. Однако применение такого рода определения шума источника возможно только в существующей застройке при ее реконструкции. К сложностям использования этого метода можно отнести, прежде всего, зависимость результатов измерения от климатических, временных, пространственных условий, а также их одномоментность. Наиболее рациональным можно считать применение метода природных измерений при научных исследованиях и составлении кадастра шума городских источников.

Расчетный метод предполагает использование известных математических моделей зависимости уровня шума источника от конкретных технических характеристик и условий, опирающихся на базу данных в справочной и нормативной литературе. Метод является приближенным, так как опирается на усредненные для всех видов источников данные, не имеющие диапазона вариантности, но удобен для прогнозирования шумового загрязнения территории.

В архитектурной практике при разработке новых проектов приемлемым методом можно считать расчетный. Такой метод наиболее универсален, он позволяет оценивать шум на всех уровнях градостроительного рассмотрения. При выполнении курсовой работы целесообразно применить компьютерный расчет либо другие современные информационные технологии.

Графоаналитический метод базируется на результатах экспериментальных исследований, представленных в виде номограмм, в которых обобщены данные об источниках шума и поправки на условия распространения звука. Он является одним из упрощенных методов оценки, предназначенным для инженерных расчетов, и используется в дополнение к расчетному методу.

На разных уровнях проектирования полнота исходной информации значительно различается и в зависимости от этого методы расчета также могут быть различны.

Так, при разработке генерального плана развития города отсутствует детальная информация о составе потоков, скоростях движения и т.д., поэтому пользуются специальными кадастровыми таблицами.

На стадии разработки проектов детальной планировки и проектов застройки, когда известны характеристики движения, (состав транспортных потоков, параметры продольного и поперечного профиля, типы покрытия проезжей части улиц и т.д.) шумовая характеристика определяется расчетным методом.

### 1.1.2. Теоретические основы расчета шумового режима застройки

Движение транспорта в городе является наиболее активным источником шума [1 – 4]. По отношению к городской среде, как правило, рассматривают не отдельные средства транспорта, а комплексные источники – линейные транспортные потоки. Их основными характеристиками являются интенсивность движения в двух направлениях, средневзвешенная скорость потока, состав потока (процент грузового и общественного транспорта), наличие трамваев в потоке. Также обязательно учитываются условия движения: продольный уклон магистрали наличие перекрестков, пересечений в разных уровнях, разделительной полосы, характер прилегающей застройки и др.

Статистическая модель расчета описывается формулой:

$$L_{A \text{ экв}} = 10 \lg N + 13,3 \lg \bar{v} + 8,4\rho \pm \Delta A,$$

где  $L_{A \text{ экв}}$  – эквивалентный уровень шума в 7,5 м от оси первой полосы движения, дБА;

$N$  – интенсивность движения в обоих направлениях, приведенных. ед/ч;

$\bar{v}$  – средневзвешенная скорость потока, км/ч;

$\rho$  – процент грузового и общественного транспорта в потоке;

$\Delta A$  – сумма поправок, учитывающих продольный уклон магистрали, тип дорожного покрытия, наличие перекрестков, пересечений в разных уровнях, разделительной полосы и характер прилегающей застройки.

На рис. 1 представлена номограмма, которой удобно пользоваться при расчете эквивалентного уровня шума от потока транспорта, с учетом поправок, представленных в табл. 1 и 2.

В соответствии с требованиями международного стандарта *ISO 1996* шумовая характеристика должна учитывать изменение интенсивности движения транспортных потоков в течение дня, поэтому определяется в зависимости от средней часовой интенсивности за дневной период суток. При отсутствии данных о среднечасовой интенсивности движения за дневной период времени, допускается принимать значение этой величины, равное 7 % среднегодовой суточной интенсивности движения.

При размещении бульваров и пешеходных аллей между полосами проезжей части разных направлений движения, шумовая характеристика определяется отдельно для каждого направления движения. Расчет, как правило, выполняется в табличной форме (табл. 3), а его результаты наносятся на карту города.

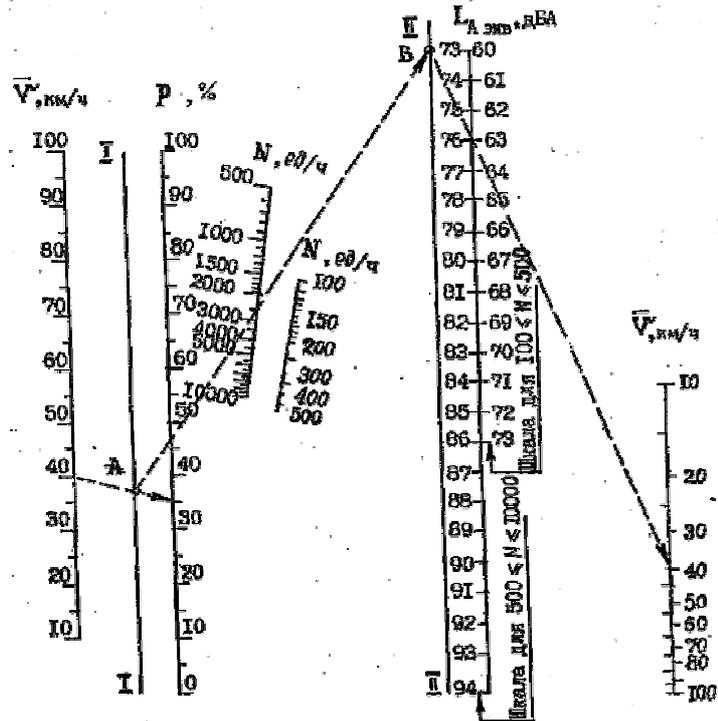


Рис. 1. Номограмма для определения шумовой характеристики  $L_{A экв}$  транспортных потоков:  
 $v$  – средневзвешенная скорость потока;  
 $p$  – состав потока;  
 $N$  – интенсивность движения

Таблица 1

Поправки к эквивалентному уровню, учитывающие характеристики пути

Влияющий фактор	Численная величина поправки, дБА							
	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
Продольный уклон, $\alpha$ %				0	2	4	6	8
Разделительная полоса между проезжими частями шириной, м	15-30	7-15	3-7	3				
Число полос движения			8	6	4	2		
Материал покрытия при средней скорости движения, км/ч:								
асфальтобетон				40-80				
железобетон, цементобетон				10-40	40-60	60-80	Свыше 80	
брусчатый камень					10-20	20-40	40-60	60-80
булыжный камень					10	20	30	40
Перекрестки:								
регулируемый					Добавляется			
эстакадное пересечение улиц:								
одной категории							Добавляется	
различных категорий							Добавляется	

Таблица 2

Поправка к эквивалентному уровню, учитывающая тип застройки, дБА

Тип застройки	Численная величина поправки при усредненных разрывах между зданиями, м			
	более 30	от 30 до 20	от 20 до 10	менее 10
Односторонняя, при расстоянии от линии застройки до края проезжей части, м: более 40 от 25 до 40 от 12 до 25 от 6 до 12			+1	+1
	+1	+1	+2	+2
	+1	+2	+3	+3
Двусторонняя при ширине улицы между линиями застройки, м: более 50 от 40 до 50 от 30 до 40 от 20 до 30 от 10 до 20		+1	+1	+1
	+1	+2	+2	+3
	+2	+3	+4	+5
	+4	+5	+6	+7

Таблица 3

Расчет эквивалентного уровня шума потоков автомобильного транспорта

№ п/п	Наименование участка магистрали	N, при-вед. ед/ч	v, км/ч	ρ, %	Исходный эквивалентный уровень шума на магистрали, L <sub>АЭКВ</sub> , дБ А	Поправки, учитывающие факторы снижения уровня шума, дБА	Расчетный эквивалентный уровень шума на магистрали, L <sub>АЭКВ</sub> , дБА (с учетом поправок)	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Снижение шума за счет поглощения в атмосфере  $\Delta L_{ногл}$  учитывает относительное поглощение звука в воздушной среде  $A_1$  и поглощение звука  $K_n$  поверхностью между источником и расчетной точкой и определяется по формуле:

$$\Delta L_{ногл} = A_1 \cdot K_{II}.$$

В проектной практике при оценке шумового режима относительное снижение шума в воздушной среде на ровной открытой территории рекомендуется учитывать с помощью графика, представленного в СНиП [1]. График для определения снижения уровня звука в зависимости от расстояния между источником шума и расчетной точкой приведены на рис. 2 (1 – точечные источники; 2 – линейные источники). В курсовой работе транспортные потоки следуют принимать как линейные источники шума.

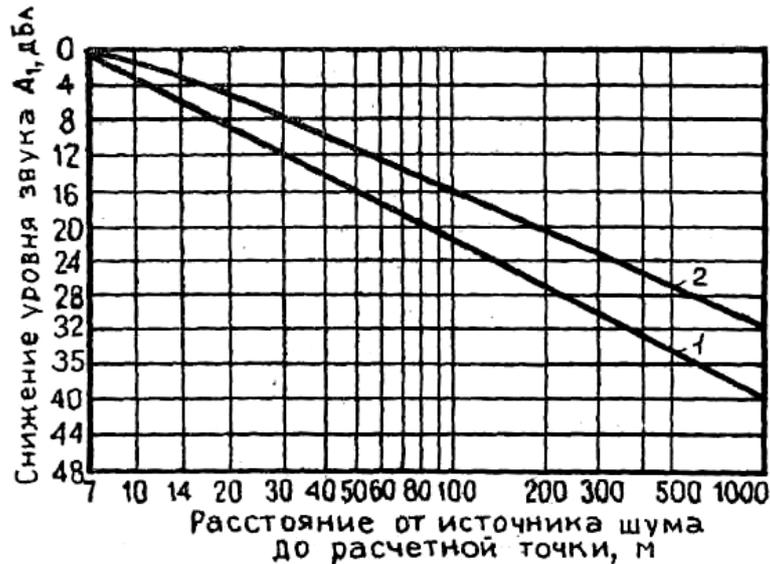


Рис. 2

В зависимости от характера земной поверхности имеет место большее или меньшее снижение, а в ряде случаев и некоторое относительное увеличение уровня звукового давления за счет отражения и фокусирования звуковых лучей.

Поглощение происходит, как правило, над почвой, покрытой травой и кустарником.

Отражение отмечается при наличии гладких твердых покрытий поверхности земли, например при асфальтировании, бетонной одежде дорог и площадей и при других подобных конструкциях.

Коэффициент  $K_{II}$  следует учитывать в следующих случаях:

- если точка расчета расположена на высоте менее 5 м и удалена от источника на расстояние до 100 м;
- если точка расчета расположена на высоте менее 10 м и удалена от источника на расстояние от 100 до 500 м;
- для всех расчетных точек, удаленных более 500 м от источника.

Для поверхности с кустарником и деревьями  $K_{II} = 1,4 - 1,2$ .

Для поверхности с газоном  $K_{II} = 1,1$ .

Для разрыхленной поверхности  $K_{II} = 1,0$ .

Для поверхности, покрытой асфальтом, льдом и водой,  $K_{II} = 0,9 - 0,8$ .

Снижение шума за счет экранирования зелеными насаждениями  $\Delta L_{зел}$  во многом зависит от плотности и ширины зеленой зоны.

Эффект снижения шума в зеленых насаждениях зависит от характера посадок, породы деревьев и кустарников, времени года, а также от частотного состава шума, распространяющегося через эти насаждения. Снижение уровня звука полосами зеленых насаждений принимается в соответствии с рекомендациями [1] по табл. 4.

Таблица 4

## Эффективность поглощения шума зелеными насаждениями

№ п/п	Ширина полосы зеленых насаждений, м	Снижение уровня звука, дБА	Конструкция шумозащитной полосы
1	10 – 14	4 – 5	Однорядная с живой двухъярусной изгородью на переднем плане и шахматной посадкой деревьев внутри полосы.
2	14 – 20	5 – 8	Однорядная с живой двухъярусной изгородью на переднем плане и шахматной посадкой деревьев внутри полосы.
3	20 – 30	8 – 10	Двухрядная с разрывами между рядами 3 – 5 м, конструкция рядов аналогична приведенной в пп. 1, 2.
4	25 – 30	10 – 12	Двух- или трехрядная с разрывами между рядами 3 м, конструкция рядов аналогична пп. 1 – 3.

*Примечание.* Высоту деревьев следует принимать не менее 5 – 8 м, кустарников – не менее 1,5 – 2 м.

При условиях, отличных от данных в табл. 4, шумозащитный эффект зеленых насаждений можно рассчитать по формуле:

$$L_n = 20 \lg \frac{r_1 + \sum_1^z B_n + \sum_1^z A_n}{r_1} + 1,5z + \beta \sum_1^z B_n,$$

где  $L_n$  – снижение уровня звукового давления за полосой зеленых насаждений;

$r_1$  – расстояние от источника до фронта шумозащитной полосы;

$B_n$  – ширина  $n$ -ной полосы;

$A_n$  – ширина разрыва между шумозащитными полосами;

$z$  – количество рядов;

$\beta$  – удельное поглощение звуковой энергии зелеными насаждениями.

*Снижение шума  $\Delta L_{\text{экр}}$  за счет экранирования экранами (стенками, зданиями, выемками, насыпями) различной протяженности определяется специальным расчетом, учитывающим планировочные ограничения звуковой волны жилой застройкой и преградами на пути распространения звуковой волны.*

При расчете снижения уровня звука за экранирующими сооружениями бесконечной длины от транспортных потоков учитывается ряд зависимостей в указанной далее последовательности:

– Вычерчивают в масштабе принципиальную схему расположения источника шума, экранирующего сооружения и расчетной точки. Расчет-

ные схемы для определения разности хода звуковых лучей  $d$  при экранировании источников шума показаны на рис. 3 (а – стенками; б – зданиями; в – выемками; г – насыпами).

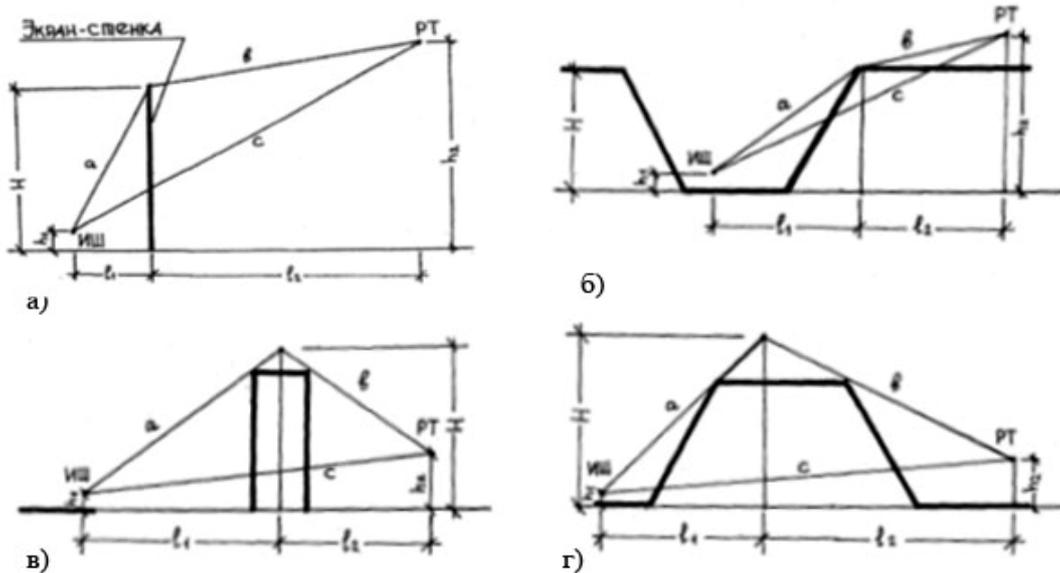


Рис. 3

Источник шума транспортных средств рекомендуется изображать точкой, взятой по оси, наиболее удаленной от точки расчета, полосы или колеи движения, на высоте 1 м от поверхности проезжей части улицы.

Расчетные точки на территориях, прилегающих к жилым домам и зданиям больниц, намечают на уровне середины окна верхнего этажа защищаемого от шума здания на расстоянии 2 м от его фасада или на уровне 1,5 м от поверхности земли.

При экранировании источников шума стенками, зданиями, насыпами или выемками значение разности длин путей прохождения звуковых лучей  $d$  рекомендуется определять по расчетным схемам, представленным на рис. 3. На схеме приняты следующие обозначения:

ИШ – источник шума; РТ – расчетная точка;  $l_1$  – расстояние между источником шума и экраном;  $l_2$  – расстояние между экраном и расчетной точкой;  $a$  – расстояние между источником шума и вершиной экрана;  $b$  – расстояние между вершиной экрана и расчетной точкой;  $h_1$  – высота источника шума;  $h_2$  – высота расчетной точки;  $H$  – высота экрана.

Находят длину прямых линий  $a, b, c$ , м, графически или по формулам:

$$a = \sqrt{l_1^2 + (H - h_1)^2}; \quad b = \sqrt{l_2^2 + (h_2 - H)^2} \text{ при } (h_2 \geq H)$$

$$b = \sqrt{l_2^2 + (H - h_2)^2} \text{ при } (H \geq h_2); \quad c = \sqrt{(l_1 + l_2)^2 + (h_2 - h_1)^2}$$

где  $l_1, l_2, l_1 + l_2$  – проекции расстояний соответственной  $a, b, c$ , (м);

После расчета величин  $a$ ,  $b$ ,  $c$  определяют разность длин путей прохождения звукового луча ( $d$ ) в соответствии со схемами экранов по формуле:

$$d = (a + b) - c.$$

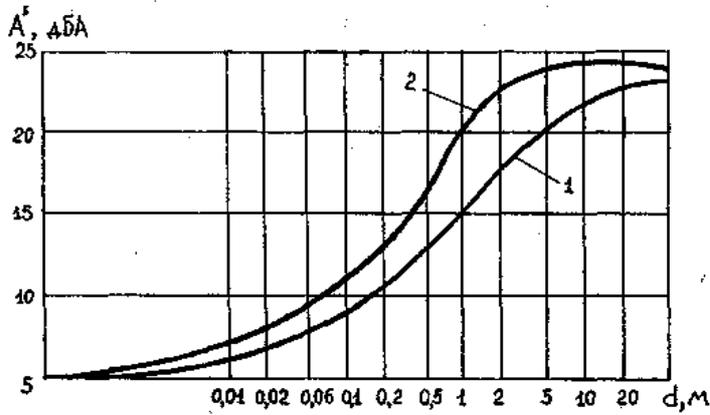


Рис. 4

– В зависимости от величины  $d$  и вида источника шума по рис. 4 определяют величину снижения уровня звука  $A^B$  экраном бесконечной длины. График для определения снижения уровня звука экраном показан на рис. 4 (1 – линейные источники; 2 – точечные источники).

Если в курсовой работе анализируется экранирующее сооружение ограниченной длины, то расчет следует продолжать в указанном далее порядке:

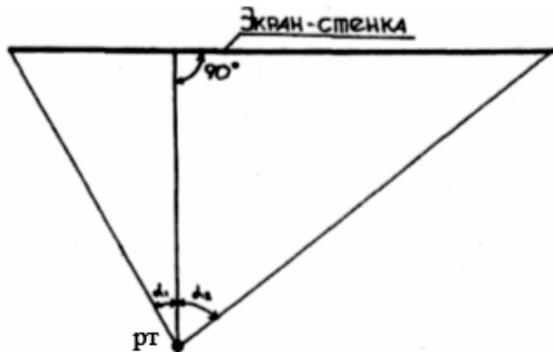


Рис. 5

– Вычерчивают в масштабе принципиальную схему расположения экрана и расчетной точки в плане (рис. 5).

– Опускают перпендикуляр из расчетной точки на экран, соединяют прямыми линиями расчетную точку с краями экрана.

Определяют углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  между перпендикуляром и линиями, соединяющими расчетную точку с краями экрана. Вычисляют величину  $d$ . По рис. 4 определяют снижение уровня звука экраном  $A^B$ .

В зависимости от величины углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и от  $A^B$  определяют величины снижения уровня звука экраном  $\Delta L_{\text{экр}} \alpha_1$  и  $\Delta L_{\text{экр}} \alpha_2$  по табл. 5.

В зависимости от разницы  $\Delta L_{\text{экр}} \alpha_1$  и  $\Delta L_{\text{экр}} \alpha_2$  определяют по табл. 6 поправку  $W$  и суммируют ее с меньшей из величин  $\Delta L_{\text{экр}} \alpha_1$  и  $\Delta L_{\text{экр}} \alpha_2$ .

Таким образом будет определена величина снижения уровня звука экраном конечной длины при линейном источнике шума.

Снижение уровня звука от точечного источника экраном конечной длины определяется по табл. 7.

Расчетный уровень звука от нескольких источников шума определяется энергетическим суммированием уровней. Сложение ведется последовательно, начиная с самых высоких уровней. Определяется разность двух

складываемых уровней, находится соответствующая добавка по табл. 8. Затем добавку прибавляют к большему из складываемых уровней. Полученный уровень складывают со следующим и т. д.

Таблица 5

Снижение уровня звука за экраном

$\Delta L_{\text{экр. макс.}}$ , дБА	Угол								
	45	50	55	60	65	70	75	80	85
	Фактическое снижение уровня звука за экраном								
6	1,2	1,7	2,3	3,0	3,8	4,5	5,1	5,7	6,0
8	1,7	2,3	3,0	4,0	4,8	5,6	6,5	7,4	8,0
10	2,2	2,9	3,8	4,8	5,8	6,8	7,8	9,0	10,0
12	2,4	3,1	4,0	5,1	6,2	7,5	8,8	10,2	11,7
14	2,6	3,4	4,3	5,4	6,7	8,1	9,7	11,5	13,3
16	2,8	3,6	4,5	5,7	7,0	8,6	10,4	12,4	15,0
18	2,9	3,7	4,7	5,9	7,3	9,0	10,8	13,0	16,8
20	3,2	3,9	4,9	6,1	7,6	9,4	11,3	13,7	19,7
22	3,3	4,1	5,1	6,3	7,9	9,8	11,9	14,5	20,7
24	3,5	4,3	5,8	6,5	8,2	10,2	12,6	15,4	22,6

Таблица 6

Поправка к разности эффектов снижения уровня звука

Разность между $\Delta L_{\text{экр} \alpha_1}$ и $\Delta L_{\text{экр} \alpha_2}$ , дБА	0	2	4	6	8	10	12	14	16 и более
W, дБА	0,0	0,8	1,5	2,0	2,4	2,6	2,8	2,9	3,0

Таблица 7

Снижение уровня звука экраном  $L_{\text{Аэкр}}$ , дБА

Расстояние между источником шума и экраном, м	Расстояние между экраном и расчетной точкой, м									
	5		10		20		50		100	
	Эффективная высота экрана, м									
	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3
2	19	29	18	28	18	28	18	27	18	27
5	17	26	16	25	15	24	15	23	15	23
10	16	25	15	23	14	23	13	21	13	21
20	15	24	14	23	13	20	12	18	11	18
50	15	23	13	21	12	19	10	17	10	15
100	15	23	13	21	11	18	10	17	9	14

Таблица 8

Сложение уровней звука

Разность двух складываемых уровней, дБА	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
Добавка к более высокому уровню, дБА	3,0	2,5	2,0	1,8	1,5	1,2	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2	0,0

Октавные уровни звукового давления от нескольких источников шума, дБ, определяются как сумма уровней звукового давления, дБ, в выбранной расчетной точке от каждого источника шума:

$$L_{\text{сум}} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i},$$

где  $L_i$  – октавный уровень мощности, создаваемый  $i$ -тым источником шума.

На оценку состояния шумового загрязнения застройки влияет совокупность акустических, санитарно-гигиенических, градостроительных и экономических критериев. Для полноценного представления о шумовой угрозе очень важно учитывать социальные параметры использования территории (численный и демографический состав населения) и, конечно, экономический ущерб от шумового загрязнения.

В случае выявленной необходимости защиты населения от шума должны разрабатываться градостроительные, архитектурно-планировочные, строительно-конструктивные мероприятия, включающие:

- изменение функционального использования территории и объемно-пространственного решения застройки;
- использование подземного пространства для размещения транспортных и других источников интенсивного внешнего шума;
- устройство разрывов между жилой застройкой и источниками шума и объектами защиты шумозащитных экранов-барьеров и озеленения;
- применение шумозащищенных жилых зданий;
- изменение функционального использования зданий или их первых этажей, перепланировку квартир;
- усиление звукоизоляции наружных ограждающих конструкций, оконных проемов существующих жилых и общественных зданий [5].

### 1.1.3. Примеры расчетов

**Пример 1.** Выполните расчет для часа «пик» эквивалентного уровня шума от транспортного потока при следующих условиях:

Транспортные характеристики:

1. Интенсивность движения  $N = 2000$  ед./ч;
2. Средневзвешенная скорость транспортного потока  $\bar{v}_{\text{ср}} = 30$  км/ч;
3. Состав транспортного потока ( $\rho = 40\%$ ) – экипажи грузового и общественного транспорта.

Градостроительные условия движения:

1. Категория магистрали – магистральная дорога регулируемого движения.
2. Материал покрытия проезжей части – асфальтобетон.
3. Продольный уклон проезжей части  $\alpha = 3 \%$ .
4. Проезжая часть размещена симметрично относительно оси улицы и имеет максимальное количество полос движения.
5. Тип застройки – двухсторонняя при ширине улицы между линиями застройки 67,75 м и усредненных разрывах между зданиями на линии застройки – 25 м;
6. Коэффициент поглощения  $K_{\text{пл}}$  принять равным 1.

*Выполняются ли условия комфортности по уровням шума у фасада здания и в жилых помещениях со стороны магистрали?*

### Решение

Эквивалентный уровень звука  $L_{\text{Аэкв}}$  от транспортных потоков на улицах и дорогах определяется для точки, расположенной в 7,5 м от оси ближайшей полосы движения транспортного потока.

Согласно расчетной методике  $L_{\text{Аэкв}}$  находится с помощью номограммы по трем транспортным характеристикам: интенсивности, средневзвешенной скорости и составу транспортного потока (учитывается процент общественного и грузового транспорта в нем) – и дополнительно влияющим факторам, характеризующим градостроительные условия движения транспортного потока. Эта величина называется шумовой характеристикой транспортного потока. Расчетная формула имеет вид:

$$L_{\text{Аэкв}} = L_{\text{Аэкв.норм}} + \sum_1^i \Delta L_i,$$

где  $L_{\text{Аэкв}}$  – шумовая характеристика транспортного потока на расстоянии 7,5 м от оси ближайшей полосы движения, дБА;

$L_{\text{Аэкв.норм}}$  – эквивалентный уровень шума, определяемый с помощью номограммы (рис. 1) по трем транспортным характеристикам средневзвешенной скорости, наличию в потоке грузового и общественного транспорта (%), средневзвешенной интенсивности движения транспортного потока;

$\sum_1^i \Delta L_i$  – сумма поправок на градостроительные условия движения транспортных потоков (определяется по табл. 1 и 2).

По заданным характеристикам ( $N = 2000$  ед./ч;  $\rho = 40 \%$ ;  $\bar{v}_{\text{ср}} = 30$  км/ч) значение  $L_{\text{Аэкв.норм}}$  по номограмме составляет 74 дБА.

$\Delta L_{A_{\text{экр.норм}}}$  – учитывает уклон проезжей части, 3 %, дают поправку 1,5 дБА.

$\Delta L_1$  – учитывает материал покрытия проезжей части. Для асфальтобетона при  $\bar{v}_{\text{ср}} = 30$  км/ч поправка равняется 0.

$\Delta L_2$  – учитывает особенности застройки. При двухсторонней застройке, ширине улицы в линиях застройки, равной 67,75 м, и усредненных разрывах между зданиями на линии застройки 25 м, поправка составляет 0.

Следовательно,

$$L_{A_{\text{экв}}} = 74 + 1,5 + 0 + 0 = 75,5 \text{ дБА} \approx 76 \text{ дБА.}$$

Для магистральной дороги регулируемого движения принимаем количество полос движения проезжей части, равное 6.

Ширина одной полосы движения равна 3,75 – 3,50 м, следовательно, ширина проезжей части с учетом ширины предохранительной полосы (0,5 м) между проезжей частью и бордюром:

$$3,75 \times 6 + (0,5 \times 2) = 23,5 \text{ м.}$$

Ширина улицы в линиях регулирования застройки согласно заданию равна 67,75 м. При условии расположения проезжей части симметрично оси улицы расстояние от бордюра до линии застройки:

$$\frac{67,75 - 23,5}{2} = 22,125 \text{ м.}$$

Ось первой полосы движения находится от бордюра на расстоянии  $3,75/2 + 0,5 = 2,375$  м. Следовательно, от нее до линии застройки расстояние:

$$22,125 + 2,375 = 24,5.$$

У фасада здания уровень шума оценивается в двух метрах от наружных стен на высоте 1,5 м от поверхности земли. Согласно рис. 2 для определения снижения уровня звука в зависимости от расстояния между источником шума и расчетной точкой, которое в данном случае составляет 22,5 м, эквивалентный уровень шума уменьшится на 6 дБА и составит 70 дБА, что значительно превышает допустимый уровень шума для территории жилой застройки, для которой  $L_{A_{\text{дон}}}$  равен 55 дБА в дневной период суток. Следовательно, у фасада здания не выполняются условия комфортности по уровню шума.

Для внутренних помещений уровень шума снижается по сравнению с внешним на 10 дБА (при открытых форточке, узкой створке или фрамуге).

Для расчетных условий уровень шума внутренних жилых помещений:

$$70 - 10 = 60 \text{ дБА.}$$

Уровень шума в 60 дБА превышает нормативный уровень шума для жилых помещений.

В таких случаях для снижения уровня шума во внутренних помещениях до нормативного целесообразно применить специальную конструкцию окна.

**Пример 2.** Выполняются ли условия комфортности по уровню шума на площадке отдыха в парке, примыкающей к магистральной улице, при следующих условиях:

Транспортные характеристики:

1. Интенсивность движения  $N = 1600$  ед./ч.
2. Средневзвешенная скорость движения  $20$  км/ч.
3. Состав транспортного потока – в потоке движется  $30\%$  грузового и общественного транспорта.

Градостроительные условия движения:

1. Магистральная улица – улица районного значения.
2. Характер покрытия проезжей части – асфальтобетон.
3. Продольный уклон улицы –  $2\%$ .
4. Расстояние от бордюра проезжей части до границы парка –  $25$  м и от границы парка до площадки –  $43$  м.
5. Тип застройки – застройка односторонняя, отстоящая от края проезжей части на  $25,5$  м; усредненные разрывы между зданиями равны  $22$  м.
6. Коэффициент поглощения  $K_n = 1,3$ .

*Если не выполняются условия по уровню шума на площадках отдыха при данных условиях, следует дать предложения по его снижению.*

### Решение

Для площадок отдыха согласно [1] комфортными по уровням шума являются уровни, не превышающие допустимую величину  $45$  дБА.

Соответствует ли уровень шума при указанных в задании условиях нормативно допустимому уровню, можно определить на основании расчета.

По трем характеристикам транспортного потока: средневзвешенной скорости потока  $\bar{v}_{cp} = 20$  км/ч, интенсивности транспортного движения  $N = 1600$  ед./ч и составу транспортного потока с учетом процентного наличия в потоке грузового и общественного транспорта  $p = 30\%$  определяется эквивалентный уровень шума  $L_{экв}$  без учета градостроительных условий движения. Транспортный поток с указанными характеристиками будет создавать шум в  $67,5$  дБА.

При уклоне  $2\%$  шумность потока возрастает на  $1$  дБА, при односторонней застройке, отстоящей от линии бордюра на  $25,5$  м, и усредненных разрывах между зданиями в  $22$  м шумность транспортного потока не изменится, асфальтобетонное покрытие также не увеличит уровень создаваемого шума (см. табл. 1 и 2).

Следовательно, эквивалентный уровень шума на расстоянии 7,5 м от оси первой полосы движения на уровне 1,2 м от поверхности земли  $67,5 + 1 = 68,5$  дБА.

От источника шума (ось полосы движения) площадка удалена на расстояние, равное сумме половины ширины полосы движения  $3,5/2$ , расстояния от бордюра до границы парка 25 м и от границы парка до площадки 43 м, то есть  $1,8 + 25 + 43 = 69,8$  м.

Согласно графику для определения снижения уровня звука в зависимости от расстояния между источником шума и расчетной точкой (см. рис. 2) определяем снижение звука на расстоянии 69,8 м, которое составит 14 дБА. С учетом наличия деревьев и кустарников в парке найденную величину увеличиваем на коэффициент поглощения  $K_n = 1,3$ .

Тогда снижение звука

$$14 \times 1,3 = 18,2 \text{ дБА.}$$

Следовательно, на площадке уровень звука

$$68,5 - 18,2 = 50,3 \text{ дБА,}$$

что превышает допустимый уровень шума на 5,3 дБА.

Нормативного уровня звука на площадке отдыха можно достичь организацией шумозащитной полосы, которая представляет собой 8 рядов лиственных деревьев (клен остролистный, вяз обыкновенный, липа мелколистная, тополь бальзамический), посаженных в шахматном порядке с кустарником в двухъярусной живой изгороди и подлеском (клен татарский, жимолость татарская, боярышник сибирский, терн белый) в пространстве между оградой и площадкой отдыха. Это даст снижение звука на 9 дБА.

**Пример 3.** Определить, выполняются ли условия комфортности по уровню шума на площадке отдыха, расположенной за зданием при следующих условиях:

Градостроительные условия движения:

1. Примыкающая магистраль – районного значения, она характеризуется эквивалентным уровнем шума, равным 68 дБА.
2. Проезжая часть имеет 4 полосы движения шириной 3,5 м каждая.
3. Площадка отдыха размером 10×10 м находится на расстоянии 20 м с тыльной стороны от здания, на равном расстоянии от его углов.

Экранирующее сооружение:

1. Здание имеет высоту, равную 30 м, ширину 12 м; длину 210 м.
2. Здание находится на расстоянии 20 м от линии бордюра.
3. Поверхность имеет посадки деревьев и кустарников.
4. Коэффициент поглощения  $K_n = 1,3$ .

*Если не выполняются условия комфортности по уровню шума для площадки отдыха, то какими градостроительными мероприятиями можно снизить уровни шума до нормативных значений?*

### Решение

Комфортными условиями по уровням шума на площадках отдыха в микрорайонах считаются такие, при которых обеспечиваются допустимые уровни звука, установленные санитарными нормами.

Для площадок отдыха в микрорайонах допустимыми считаются уровни звука, равные 45 дБА.

Для определения соответствия уровней шума на рассматриваемой площадке при заданных условиях нормативным значениям необходимо выполнить расчет.

Для расчетной точки уровень шума будет снижен за счет расстояния между источником шума и расчетной точкой  $A_1$  и за счет экранирования зданием (точка  $A_2$ ).

Определяется относительное снижение уровня шума в воздушной среде в зависимости от расстояния между источником шума и расчетной точкой  $A_1$ . За расчетную принимается точка на высоте 1,5 м над геометрическим центром площадки отдыха. Расстояние между источником шума и расчетной точкой будет равно сумме расстояний: половины ширины ближайшей полосы движения проезжей части ( $3,5/2$  м); расстояния от бордюра до здания (20 м); ширины здания (12 м), расстояния от здания до границы площадки (20 м), и от границы площадки до расчетной точки ( $10/2$  м):

$$\frac{3,5}{2} + 20 + 12 + 20 + \frac{10}{2} = 58,75 \text{ м}$$

Согласно рис. 2 уровень звука на расстоянии 58,75 м от источника шума снижается приблизительно на 12 дБА. На поверхности земли с кустарником и деревьями эффект снижения будет больше за счет поглощения, так как расчетная точка расположена на расстоянии, не превышающем 5 м от поверхности земли, и не далее 100 м.

Коэффициент поглощения  $K_{II}$  имеет значение 1,4 – 1,2, поэтому для расчета берем среднюю величину, равную 1,3. Общий эффект снижения, таким образом:

$$A_1 = 12 \times 1,3 = 15,6 \text{ дБА.}$$

Для определения относительного снижения шума за счет экранирования зданием ( $A_2$ ) вычерчивается расчетная схема взаиморасположения источника шума и расчетной точки (рис. 6).

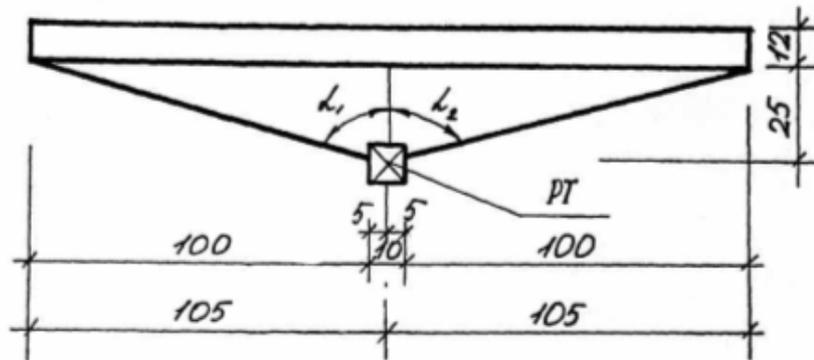
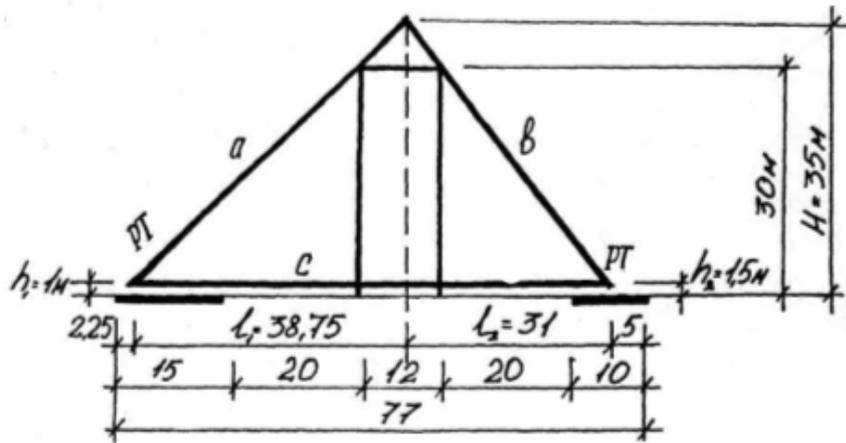


Рис. 6

Источник шума для определения эффекта снижения шума за счет его экранирования считается расположенным на оси, наиболее удаленной от точки расчета полосы движения, на высоте 1 м от поверхности проезжей части. Для определения эффективности снижения шума экранирующим зданием определяется разность длины пути прохождения звука из точки источника шума (ИШ) до расчетной точки (РТ) по прямой  $c$  (без наличия здания) и по  $a + b$  (при наличии здания) графическим методом (измеряется) или расчетным путем при помощи формул:

$$a = \sqrt{38,75^2 + (35 - 1)^2} = \sqrt{1501,56 + 1156} = 51,56 \text{ м};$$

$$b = \sqrt{31^2 + (35 - 1,5)^2} = \sqrt{961 + 1122,25} = 45,67 \text{ м};$$

$$c = \sqrt{(38,75 + 31)^2 + (1,5 - 1)^2} = \sqrt{69,51 + 0,25} = 69,76 \text{ м};$$

$$d = (a + b) - c = 97,20 - 69,76 = 27,44 \text{ м}.$$

По найденной величине 27,44 м находится относительное снижение уровня звука экраном  $A_2$  по графику (рис. 4).  $A_2 = 23$  дБА.

Однако это значение будет соответствовать экрану бесконечной длины. Для учета снижения шума зданием конечной длины вводим поправки на проникновение шума в расчетную точку из-за углов здания. Для этого на схеме, изображающей здание в плане, соединяется расчетная точка с угловыми точками экрана и определяются углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . В рассматриваемом случае эти углы равны.

Величину угла можно найти графическим методом при помощи транспортира или через тригонометрические функции.

Так, в рассматриваемом случае:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{105}{25} = 4,2.$$

По величине  $\operatorname{tg}(\alpha)$  находим угол  $\alpha$  через функцию  $\operatorname{arctg} \alpha$ .

При значении  $\operatorname{tg}(\alpha) = 4,2$   $\alpha = 76,6^\circ$ . В зависимости от найденной величины  $A_2 = 23$  дБА и величины угла  $76,6^\circ$  находятся поправки  $\Delta L_{\text{экр}}\alpha_1$ , и  $\Delta L_{\text{экр}}\alpha_2$  (см. табл. 5), которые составляют  $\approx 12,6$  дБА.

Так как  $\Delta L_{\text{экр}}\alpha_1$  и  $\Delta L_{\text{экр}}\alpha_2$  равны, разность между их величинами равна 0, то поправка  $W$  (табл. 6) равна 0.

Следовательно, здание даст дополнительное снижение уровня звука на величину 12,6 дБА.

Суммарная величина снижения шума:

$$A_1 + A_2 = 15,6 + 12,6 = 28,2 \text{ дБА.}$$

Таким образом, в расчетной точке на площадке отдыха уровень шума от автотранспорта  $68 - 28,2 = 39,8$  дБА, что ниже нормируемой величины на 5,2 дБА, то есть условие комфортности по уровню шума в заданных условиях выполняется и не требуется дополнительных градостроительных мероприятий по шумозащите.

## РАСЧЕТНЫЕ ЗАДАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

Исходные данные для расчетной части курсовой работы по теме  
«Шумовой режим застройки»

Исходные данные	Номер магистрали	
	1	2
1. План застройки (масштаб 1:1000)		
2. Расстояние между линией застройки и краем проезжей части, м (M)	$M_1$	$M_2$
3. Интенсивность движения, привед/час (N)	$N_1$	$N_2$
4. Количество грузового и общественного транспорта в потоке:	$\rho_1$	$\rho_2$
5. Скорость транспортного потока, км (v)	$v_1$	$v_2$
6. Продольный уклон улицы, % ( $\alpha$ )	$\alpha_1$	$\alpha_2$
7. Материал покрытия проезжей части		
8. Тип застройки		
9. Категория магистрали		

Студент выполняет расчет по данным вариантам, номер которого совпадает с последней цифрой его зачетной книжки (либо табельного номера в учебном журнале). План застройки в масштабе 1:1000 выдается каждому студенту индивидуально.

### Варианты исходных данных для расчетной части курсовой работы

№ варианта	$M_1$	$M_2$	$N_1$	$N_2$	$\rho_1$	$\rho_2$	$v_1$	$v_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
1	25	55	500	1200	40	45	40	70	0	4
2	30	55	700	1000	50	30	40	90	0	2
3	35	55	700	1500	60	20	40	40	0	8
4	40	30	900	500	70	0	60	90	0	0
5	45	30	900	1200	80	0	60	80	4	0
6	50	30	1200	500	90	70	60	80	2	0
7	55	25	1200	1000	10	60	80	70	8	0
8	60	25	1600	1000	20	50	80	70	4	4
9	65	25	2000	1000	30	40	40	60	2	6
0	70	25	3000	1000	0	90	70	60	4	2

## ТЕМА КУРСОВОЙ РАБОТЫ

### 1.2. АКУСТИКА ПОМЕЩЕНИЯ БОЛЬШОЙ ВМЕСТИМОСТИ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЛОВ С ЕСТЕСТВЕННОЙ АКУСТИКОЙ

#### *Литература и нормативные документы*

1. Строительные нормы и правила. СНиП 11-12-77. Глава «Защита от шума». – М. : Стройиздат, 1978. – 47 с.
2. Ковригин, С. Д. Архитектурно-строительная акустика /С. Д. Ковригин, С. П. Крышков. – М. : Высш. шк. – 1986. – 255 с.
3. Справочник по защите шума и вибраций жилых и общественных зданий / под ред. В. И. Заборова. – Киев : Будівельник, 1984. – 158 с.
4. Архитектурная физика : учебник для вузов : спец. «Архитектура» / В. К. Лицкевич, Л. И. Макриненко, И. В. Мигалина [и др.] ; под. ред. Н. В. Оболенского. – М. : Стройиздат, 2003. – 448 с.
5. Защита от шума в градостроительстве: справочник проектировщика / Г. Л. Осипов, В. Е. Коробков, А. А. Климухин [и др.] ; под. ред. Г. Л. Осипова. – М. : Стройиздат. – 1993. – 96 с.
6. Качерович, А. Н. Акустика зрительного зала / А. Н. Качерович. – М. : Искусство, 1968. – 207 с.

*Целью курсовой работы* «Акустика зрительного зала» является углубление знания по архитектурной акустике и звукоизоляции, осознание методов расчета акустических характеристик закрытых помещений многоцелевого назначения.

Проектирование специальных помещений, обладающих высокими акустическими качествами и специальными акустическими свойствами, выполняется, как правило, инженером-акустиком. Однако архитектор должен владеть методикой акустических расчетов и нормирования. Так, при проектировании простых помещений с учетом требований акустики необходимо принимать во внимание размеры и пропорции помещения, характеристики звукопоглощающих материалов, наличие экранирующих элементов и многое другое.

*Задачами курсовой работы* являются:

1. Анализ формы и размеров зала с учетом его назначения.
2. Расчет необходимого количества звуковой энергии и обоснований выбор профиля потолка зала.
3. Расчет стандартной реверберации.
4. Расчет артикуляции зала.

### 1.2.1. Основные характеристики и методы расчета звукового поля

Область акустики, изучающая качество звукового поля в помещении и методы его регулирования, называется *архитектурной акустикой*. К настоящему времени достаточно глубоко изучены процессы распространения звука в помещении и разработаны теоретические основы акустических расчетов и методов, которые адаптированы к практической работе архитекторов [1 – 4].

Существующие методы расчета параметров звукового поля основаны на волновой, геометрической и статистической акустике.

Теория волновой акустики рассматривает два режима колебаний воздушного объема: один – как собственные затухающие, другой – как вынужденные под действием какого-либо источника. В области низких частот, собственные частоты колебаний отделены друг от друга сравнительно большими интервалами, то есть имеют дискретную структуру. В области высоких частот спектр уплотняется, число собственных колебаний быстро увеличивается. Если размеры помещения не слишком малы, то собственные частоты располагаются так плотно, что любая компонента в спектре источника звука возбуждает целый ряд собственных колебаний воздушного объема с частотами, мало отличающимися от частоты возбуждающей компоненты. Чем меньше размеры помещения, тем в большем диапазоне частот будут наблюдаться резонансные явления и увеличиваться неравномерность звукового поля.

В геометрической акустике при рассмотрении отражения звуковых волн от поверхностей помещения используют понятия *фронт волны* и *звуковые лучи* (линии, перпендикулярные фронту волны во всех его точках), которые указывают направление распространения звуковой волны.

Действие отраженных от внутренних поверхностей звуковых лучей часто заменяется действием *мнимых* (или *фиктивных*) источников с соответствующим уменьшением их мощности, пропорциональным коэффициенту отражения данной поверхности.

На рис. 8 показана схема отраженных звуковых лучей. Мнимый источник звука расположен на перпендикуляре к поверхности и на таком же расстоянии от нее, что и действительный источник звука.

Путь звукового луча, многократно отраженного от граней прямоугольного параллелепипеда, может быть представлен в развернутом изображении в двух или трех проекциях на плоскости параллельно граням параллелепипеда. Зная скорость распространения звука, можно определить опаздывание одного звукового луча по отношению к другому, выявить различные акустические дефекты помещений. Такое построение распространения звуковых лучей называется *лучевым эскизом*.

Допустимость применения геометрической акустики зависит от длины звуковой волны, размеров отражающей поверхности и ее расположения по отношению к источнику звука и точке приема. Отражение звуковых волн можно считать направленным, если наименьший размер отражающей поверхности не менее чем в 1,5 раза превышает длину волны.

Для криволинейных поверхностей наименьший радиус кривизны должен быть не менее чем в два раза больше длины волны.

В помещениях различают *прямой* звук, идущий непосредственно от источника, и *отраженный* от поверхностей. Вследствие многократных отражений звуковых волн и суммирования энергии прямых и отраженных волн в помещении устанавливается звуковое поле с определенными уровнями звукового давления. Энергия проходит также через преграду (рис. 9).

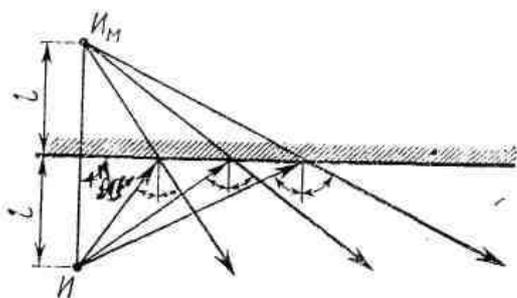


Рис. 8. Построение отраженных звуковых лучей: *И* – источник звука; *И<sub>м</sub>* – мнимый источник звука

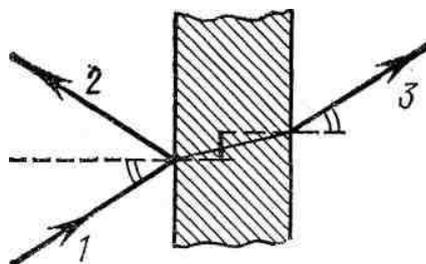


Рис. 9. Схема отражения и прохождения звука: 1 — падающий звук; 2 – отраженный звук; 3 – звук, прошедший через преграду

Законы отражения и преломления звука аналогичны законам геометрической оптики. Количественно поглощенная, отраженная и прошедшая через преграду части звуковой энергии определяются коэффициентами  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\tau$ .

Отношение поглощенной звуковой энергии к падающей называется коэффициентом звукопоглощения  $\alpha$ :

$$\alpha = (E_{над} - E_{отр}) / E_{на} ,$$

где  $E_{над}$ , и  $E_{отр}$  – энергия падающих и отраженных звуковых волн.

Коэффициент  $\alpha$  можно записать и так:

$$\alpha = (E_{\text{погл}} + E_{\text{пр}}) / E_{\text{над}},$$

где  $E_{\text{погл}}$  и  $E_{\text{пр}}$  – энергия, поглощаемая материалом преграды, и энергия, прошедшая через преграду.

Отношение энергии отраженного звука  $E_{\text{отр}}$  к  $E_{\text{над}}$  представляет собой коэффициент отражения  $\beta$ :

$$\beta = E_{\text{отр}} / E_{\text{над}}.$$

Отношение энергии прошедшего через преграду звука  $E_{\text{пр}}$  к  $E_{\text{над}}$  называется коэффициентом звукопередачи (звукопроницаемости)  $\tau$ :

$$\tau = E_{\text{пр}} / E_{\text{над}}$$

Из последнего следует, что  $\alpha + \beta = 1$  и  $\alpha = 1 - \beta$ .

Коэффициент звукопоглощения зависит от материала конструкции, частоты звуковых волн и от угла их падения на поверхность.

Обычные строительные материалы имеют невысокие значения  $\alpha$ ; например, на частоте 500 Гц значение  $\alpha$  для бетона составляет 0,01 (то есть только 1 % звуковой энергии поглощается, а остальные 99 % отражаются в помещение), оштукатуренной стены – 0,02, линолеума – 0,03, паркетного пола – 0,07. Специальные звукопоглощающие материалы (звукопоглотители) имеют коэффициенты звукопоглощения в 10 – 15 раз больше.

Суммарное звукопоглощение в помещении ( $A_{\text{общ}}$ ) определяется как сумма произведений коэффициентов звукопоглощения отдельных поверхностей на их площади. Кроме того, учитывается звукопоглощение ( $A$ ) отдельными объектами (людьми, предметами обстановки и пр.), то есть:

$$A_{\text{общ}} = \sum \alpha_i S_i + \sum A.$$

Произведение  $\alpha S$  представляет собой звукопоглощение данной поверхности. Величина  $A = \alpha S$  называется эквивалентной площадью звукопоглощения этой поверхности. Эквивалентная площадь звукопоглощения есть площадь поверхности, полностью поглощающей звук; например, при  $S = 1 \text{ м}^2$  и  $\alpha = 1,0$   $A = \alpha S = 1 \text{ м}^2$  или при  $S = 5 \text{ м}^2$  и  $\alpha = 0,2$   $A$  тоже равно  $1 \text{ м}^2$ .

Рассмотрим особенности распространения и поглощения звука в помещении.

Полное поглощение звука возможно, если  $\beta = 0$  (нет отражений) или  $\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1 = 0$  (разность *волновых сопротивлений* двух сред – преграды и воздуха). Следовательно, полное проникновение звука из одной среды в другую (при нормальном падении звука) возможно лишь в том случае, если эти среды обладают одинаковыми волновыми сопротивлениями ( $\rho_2 c_2 = \rho_1 c_1$ ), или *импедансами*. Импеданс представляет собой отношение

звукового давления на поверхности к нормальной составляющей скорости звука около нее.

Для учета звукопоглощения принимается величина *среднего коэффициента звукопоглощения*:

$$\alpha_{cp} = A_{общ} / S_{общ},$$

где  $S_{общ}$  – суммарная площадь ограждающих поверхностей.

Статистическая теория акустики основана на предположении, что в помещении под действием источника звука возникает звуковое поле, близкое к диффузному, характеризуемое тем, что во всех точках поля усредненные по во времени уровни звукового давления и поток проходящий по любому направлению звуковой энергии постоянны. При рассмотрении распространения звуковых волн не учитываются интерференционные явления, и поэтому оценку звукового поля проводят методом энергетического суммирования.

Статистическая теория рассматривает также среднюю длину пути между отражениями, то есть величину среднего пробега звуковой волны, зависящую от объема помещения  $V$ . Если за время  $t$  в точку помещения приходит  $n$  отражений, а отрезок времени между двумя последующими отражениями в среднем равен  $t_1$  то число отражений  $n = t / t_1$ . Средняя длина пути  $l_{cp} = t_1 c$  ( $c$  – скорость распространения звука). Величина  $l_{cp}$  зависит от формы помещения, однако для практических целей может быть принята постоянной:

$$l_{cp} = 4V / S_{общ},$$

где  $V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;

$S$  – суммарная площадь отражающей поверхности, м<sup>2</sup>.

Если процессы излучения и поглощения звука происходят непрерывно, то дифференциальное уравнение, вписывающее режим динамического равновесия, имеет вид:

$$V \frac{d\varepsilon}{dt} = W - A_{общ},$$

где  $\varepsilon$  – плотность звуковой энергии;

$W$  – мощность, излучаемая источником;

$A_{общ}$  – энергия, поглощаемая поверхностями помещения.

Для случая равновероятного прихода звуковой энергии в любую точку объема из всех направлений количество энергии, падающей на 1 см<sup>2</sup> поверхности в секунду, равно:

$$I = \frac{1}{4} \varepsilon c.$$

Величина суммарного звукопоглощения определяется по формуле:

$$A_{\text{общ}} = \frac{1}{4} \epsilon c \alpha_{\text{ср}} S_{\text{общ}}.$$

Время, в течение которого происходит затухание звука, называется *временем реверберации*. Этот процесс происходит вследствие многократных отражений звуковых волн от ограждающих поверхностей. Время реверберации является одним из существенных критериев оценки акустических качеств залов, так как оно характеризует общую гулкость залов. Существенным является также и то, что физическое содержание этого критерия хорошо связано с субъективным ощущением. Немаловажное значение имеет и легкость экспериментального и аналитического определения времени реверберации в уже построенных или проектируемых залах.

В качестве эталона принято время затухания плотности звуковой энергии в  $10^6$  раз (или уменьшение уровня звукового давления на 60 дБ); это время называется *временем стандартной реверберации* (обычно термином «время реверберации») заменяется:

$$T = 0,161 \frac{V}{\alpha_{\text{ср}} S_{\text{общ}}} = 0,161 \frac{V}{A_{\text{общ}}}.$$

С учетом данных экспериментальных исследований принято:

$$T = 0,163 \frac{V}{A_{\text{общ}}}$$

то есть время реверберации зависит только от объема помещения и эквивалентной площади звукопоглощения в нем.

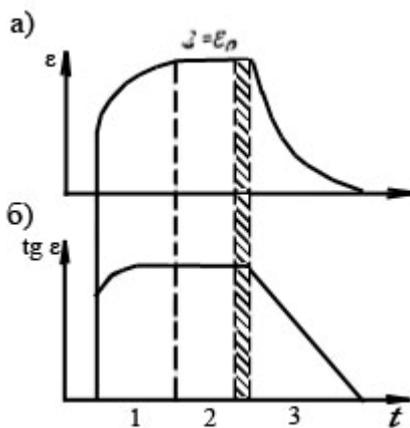


Рис. 10. Кривая нарастания и затухания плотности звуковой энергии в помещении: а – в линейном масштабе; б – в логарифмическом масштабе; 1 – зона нарастания звука; 2 – зона стационарного режима; 3 – зона затухания звука

На рис. 10 плотность звуковой энергии отложена в логарифмическом масштабе (то есть уровень в дБ); при этом получается картина, характеризующая слуховое восприятие нестационарных процессов в помещениях. Процесс нарастания уровня происходит очень быстро и поэтому не играет той большой роли в оценке акустических качеств помещений, которую оказывает процесс затухания звука. Штрихами выделен короткий интервал времени после выключения источника звука.

Энергию этого участка называют полезной, так как она определяет качество звучания речи и музыки и способствует повышению разборчивости. Звуковая энергия зоны затухания звука определяет гулкость помещения, но вместе с тем приводит к понижению разборчивости, поэтому ее называют вредной.

Статистический подход к оценке звуковых полей имеет большое значение при решении практических задач борьбы с шумом.

Учтем, что  $I = 4 W / A_{общ}$  и уровень интенсивности равен  $L_I = 10 \lg I / I_0$ . Следовательно:

$$L_I = L_W - 10 \lg A_{общ} + 6.$$

При стандартных атмосферных условиях уровень звукового давления  $L$  равен уровню интенсивности звука, поэтому:

$$L = L_W - 10 \lg A_{общ} + 6$$

Эти соотношения справедливы для диффузного звукового поля. Обычно в помещениях можно выделить плотность энергии прямого  $\varepsilon_{np}$  и отраженного от всех поверхностей  $\varepsilon_{отр}$  звука. Тогда общая плотность звуковой энергии в помещении будет равна:  $\varepsilon = \varepsilon_{np} + \varepsilon_{отр}$ .

Плотность звуковой энергии прямого звука при сферическом излучении на расстоянии  $r$  от источника равна:

$$\varepsilon_{np} = W / 4\pi r^2 c$$

Плотность диффузной звуковой энергии после учета потерь энергии при первом отражении звука от поверхностей:

$$\varepsilon_{отр} = \frac{4W}{cS_{общ}} \left( \frac{1 - \alpha_{cp}}{\alpha_{cp}} \right) = \frac{4W(1 - \alpha_{cp})}{cA_{общ}}$$

Общая плотность звуковой энергии:

$$\varepsilon = \frac{W}{4\pi r^2 c} + \frac{4W(1 - \alpha_{cp})}{cA_{общ}} = \frac{W}{4\pi r^2 c} + \frac{4W}{cB},$$

где  $B = A_{общ} / (1 - \alpha_{cp})$  – постоянная помещения.

В соответствии с последним уравнением вблизи источника уровень уменьшается на 6 дБ при увеличении расстояния  $r$  в два раза. Зона отраженного звука определяется величиной предельного радиуса  $r_{np}$ , то есть расстоянием от источника, на котором уровни звукового давления отраженного и прямого звука равны:

$$r_{np} \cong \sqrt{\frac{A_{общ}}{50(1 - \alpha_{cp})}} \cong \sqrt{\frac{B}{50}}.$$

Статистическая акустика определяет уровень звукового давления  $L$  в зоне действия прямого и отраженного звука по формуле:

$$L = L_w + 10 \lg \left( \frac{\Phi}{\Omega r^2} + \frac{4}{B} \right)$$

где  $\Phi$  – фактор направленности излучения, безразмерная величина, равная отношению интенсивности звука  $Y$ , создаваемого источником в данной точке звукового поля, к интенсивности  $Y_{сф}$ , которую имел бы источник с такой же мощностью, но равномерно излучающий звук во всех направлениях (то есть в сферу).

$\Omega$  – телесный угол, в котором излучаются звуки.

Обобщая изложенное, можно сделать следующие выводы. Волновая теория акустики позволяет получить точные решения. Однако сложность математического аппарата и большие затраты времени на расчеты ограничивают ее применение диапазоном низких частот, тем более что в этом диапазоне другие методы неприменимы.

Геометрическая акустика дает не только наглядное представление о характере распространения звука, но и позволяет количественно рассчитать положение звукопоглотителей, оценить влияние размеров и формы помещения на эффективность мер борьбы с шумом и др.

Статистическая акустика позволяет достаточно точно решать задачи для помещений с малым звукопоглощением и для диапазона высоких частот. Для помещений, в которых длина, ширина и высота изменяются в широких пределах (например, в производственных зданиях), а также имеющих неравномерное расположение звукопоглотителей, распространение звука не отвечает законам статистической акустики. Однако с учетом различных эмпирических поправок статистическая акустика позволяет наиболее просто решать практические задачи.

### 1.2.2. Примеры расчетов

**Пример 1.** Вычислить размеры зала кинотеатра вместимостью  $N = 600$  мест при удельном объеме каждого зрительного зала  $V_{зд} = 6 \text{ м}^3/\text{чел}$ .

Расчет размеров зала:

$$V = V_{зд} N = 6 \cdot 600 = 3600 \text{ м}^3.$$

Дл : Ш : В =  $8x : 5x : 3x$ , где  $x$  – модуль золотого сечения:

$$x = \frac{\sqrt[3]{V}}{4,94} = \frac{\sqrt[3]{3600}}{4,94} = 3,1025$$

$$\text{Дл} : \text{Ш} : \text{В} = 8 \cdot 3,1025 : 5 \cdot 3,1025 : 3 \cdot 3,1025 = 24,82 : 15,512 : 9,307.$$

В результате определен размер зала  $V = 4385,3 \text{ м}^3$ .

**Пример 2.** Определить время реверберации для пустого зала размером 33×22×11,5 м. Объем зала  $V = 8349 \text{ м}^3$ ,  $S_{\text{общ}} = 2717 \text{ м}^2$ , площади отдельных поверхностей и их коэффициенты звукопоглощения даны в табл. 9.

Таблица 9

Определение эквивалентной площади звукопоглощения

Поверхности, материалы	S, м <sup>2</sup>	Значения $\alpha$ и $\alpha S$ , м <sup>2</sup> , на частотах					
		125 Гц		500 Гц		2000 Гц	
		$\alpha$	$\alpha S$	$\alpha$	$\alpha S$	$\alpha$	$\alpha S$
Потолок, сухая штукатурка	726	0,02	14,5 29	0,06	43,6	0,05	36,3
Пол, паркет	726	0,04		0,07	50,8	0,07	50,8
Стены, сухая штукатурка	1265	0,02	25,3	0,06	75,9	0,05	63,3

Добавочное звукопоглощение на частоте 125 Гц равно  $217,4 \text{ м}^2$  ( $0,08 \times 2717 \text{ м}^2$ ), а на частотах 500 и 2000 Гц –  $108,7 \text{ м}^2$  ( $0,04 \times 2717 \text{ м}^2$ ). Общая эквивалентная площадь звукопоглощения равна (табл. 9) на частотах:

- 125 Гц:  $A_{\text{общ}} = 14,5 + 29 + 25,3 + 217,4 = 286 \text{ м}^2$ ;
- 500 Гц:  $A_{\text{общ}} = 279 \text{ м}^2$ ;
- 2000 Гц:  $A_{\text{общ}} = 259 \text{ м}^2$ .

Средний коэффициент звукопоглощения  $\alpha_{\text{ср}} = A_{\text{общ}} / S_{\text{общ}}$  на частотах:

- 125 Гц:  $\alpha_{\text{ср}} = 286 / 2717 = 0,105$ ;
- 500 Гц:  $\alpha_{\text{ср}} = 279 / 2717 = 0,1$ ;
- 2000 Гц:  $\alpha_{\text{ср}} = 259 / 2717 = 0,095$ .

Так как  $\alpha_{\text{ср}} < 0,2$ , то время реверберации определяем по формуле  $T = 0,163 V / A_{\text{общ}}$  на частотах:

- 125 Гц:  $T = 0,163 (8349 / 286) = 4,75 \text{ с}$ ;
- 500 Гц:  $T = 0,163 (8349 / 279) = 4,85 \text{ с}$ ;
- 2000 Гц:  $T = 0,163 (8349 / 259) = 5,25 \text{ с}$ .

Полученное время реверберации сравнивается с рекомендуемым (оптимальным) временем для данного типа зала и его объема (рис. 11).

Это время должно быть в пределах затухеванной области (усредненно по данным различных авторов) в диапазоне частот 500 – 2000 Гц. На частотах ниже 500 Гц допустимо некоторое увеличение времени реверберации, с тем, чтобы на частоте 125 Гц оно было не более чем на 40 % больше по сравнению со значением  $T$  на частоте 500 Гц. Как правило, расчетное время реверберации получается больше рекомендуемого, поэтому необходимо увеличить звукопоглощение в зале. Для этого, исходя из требуемого времени реверберации  $T_{\text{тр}}$ , вычисляем:

$$\varphi(\alpha_{\text{ср}}^{\text{тр}}) = \frac{0,163}{T_{\text{тр}} S_{\text{общ}}}.$$

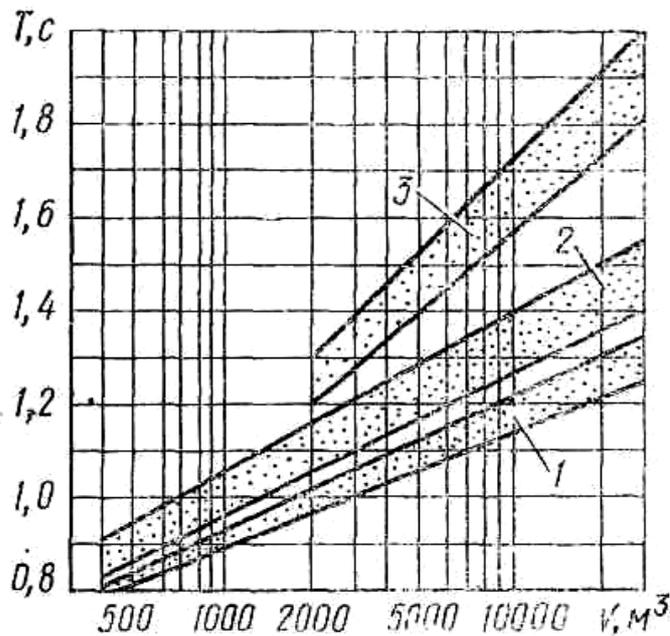


Рис. 11. Рекомендуемое время реверберации для залов различного назначения в зависимости от их объема в диапазоне частот 500 – 2000 Гц: 1 – лекционные залы, залы пассажирских помещений вокзалов; 2 – залы драматических театров, залы многоцелевого назначения средней вместимости, кинотеатры; 3 – залы театров оперы и балета, концертные залы (реверберация в пределах  $\pm 10\%$ )

Из таблицы в приложении 1 по найденному значению  $\phi(\alpha_{cp}^{mp})$  находим средний коэффициент звукопоглощения  $\alpha_{cp}^{mp}$ , после чего получаем требуемую общую эквивалентную площадь звукопоглощения зала  $A_{общ}^{mp} = \alpha_{cp}^{mp} S_{общ}$ . Сравнив это значение с величиной  $A_{общ}$ , определяем, насколько необходимо изменить эквивалентную площадь звукопоглощения для достижения нужного времени.

Полученные в результате расчета значения времени реверберации округляются с точностью до 0,05 с.

**Пример 3.** Требуется определить артикуляцию для большого зала прямоугольной формы при  $T = 2$  с и уровне шума около 50 дБ. При  $T = 2$  с коэффициент  $K_1 = 0,85$ ;  $K_2 = 1$  ( $L = 70 - 75$  дБ);  $K_3 = 0,8$  (отношение уровня шума к уровню речи  $\frac{50}{70 \div 75} \cong 0,7$ );  $K_4 \cong 0,95$ .

По формуле Кнудсена показатель артикуляции ПА вычисляется:

$$ПА = 96 K_1 K_2 K_3 K_4, \quad ПА = 96 \cdot 0,85 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 0,95 = 62 \%$$

Сравним его с гостированными показателями разборчивости речи:

ПА, %	Слоговая артикуляция
96 – 85	отличная
85 – 75	хорошая
75 – 65	удовлетворительная
65 – 60	неудовлетворительная
Менее 60	разборчивость речи отсутствует

Следовательно, в зале будет неудовлетворительная артикуляция. Для ее улучшения необходимо уменьшить время реверберации и уровень мешающего шума.

**Пример 4.** Требуется определить максимально допустимые размеры лекционного зала прямоугольной формы при соотношении высоты, ширины и длины 1 : 2 : 3. Определить время реверберации и сравнить с рекомендуемым.

Построим распределение первых отражений от потолка зала, приняв высоту 10 м (рис. 12). Результаты анализа сведем в табл. 10.

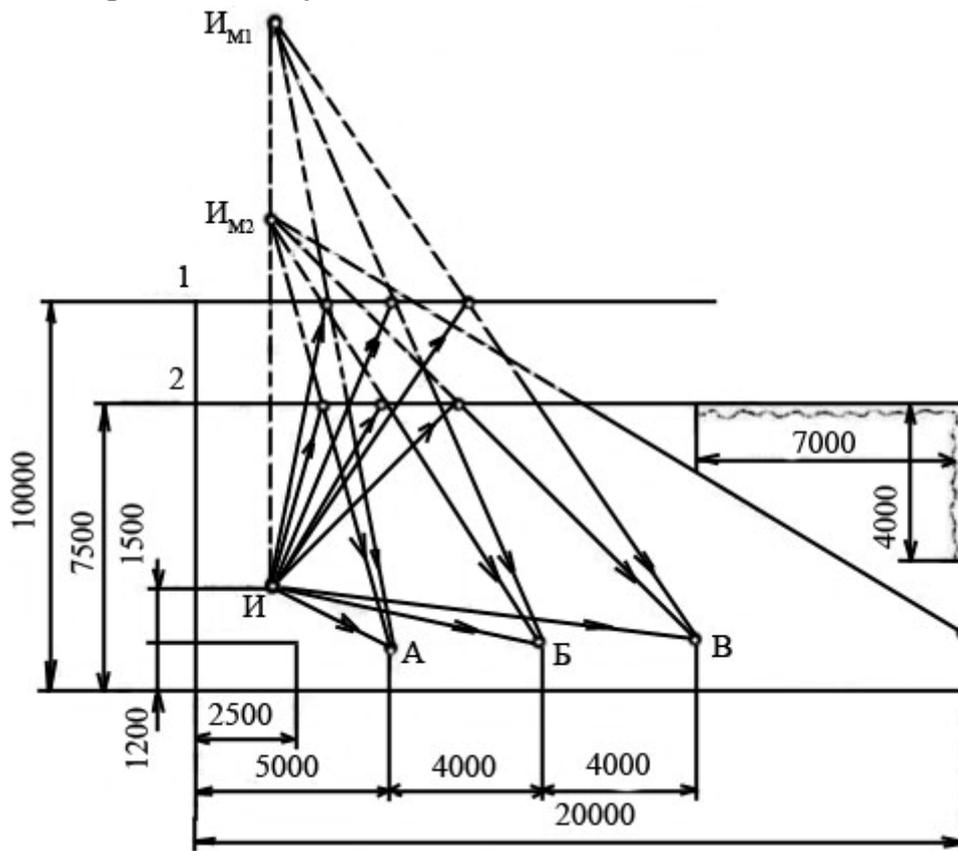


Рис. 12. Распределение первых отражений звука в аудитории

При высоте потолка 10 м для точек А и Б запаздывание первых отражений составляет более 10 м, что недопустимо. Поэтому уменьшаем высоту до 7,5 м. Только в этом случае для точки А получаем допустимое значение запаздывания. Принимаем высоту потолка 7,5 м, ширину 15 м и длину зала 22,0 м (при соотношении 1 : 2 : 3). Удаление слушателя от оратора составляет около 20 м, что является предельно допустимой величиной для лекционных залов.

Аналогично можно оценить характер запаздывания первых отражений от боковых стен. Объем зала  $V = 7,5 \times 15 \times 22,0 = 2475 \text{ м}^3$ . Необходи-

мое время реверберации на частотах 500 – 2000 Гц должно быть около 1,0 с (см. рис. 11). На частоте 125 Гц рекомендуемое время реверберации может быть допущено до значения 1,4 с ( $1,0 \times 1,4$ ).

Определим фактическое время реверберации в зале, сведя расчеты в табл. 11 и 12. Коэффициенты звукопоглощения и эквивалентная площадь звукопоглощения взяты из таблицы в приложении 1.

Таблица 10

Запаздывание первых отражений от потолка

Точки	Длина луча до встречи с потолком, м	Длина отраженного луча, м	Длина прямого луча, м.	Запаздывание отраженного луча по сравнению с прямым, м
<i>При высоте зала 10 м</i>				
A	7,5	9	3,3	16,5 – 3,3 = 13,2
B		9,6	7,2	10,4
B	8 8,8	10,6	11	8,4
<i>При высоте зала 7,5 м</i>				
A	5	6,6	3,3	8,3
B	5,7	7,6	7,2	6,1
B	6,8	8,8	11	4,6

Таблица 11

Определение эквивалентной площади звукопоглощения поверхностей зала

Поверхности, материалы	Площадь, м <sup>2</sup>	Значения $\alpha$ и $\alpha S$ , м <sup>2</sup> , на частотах, Гц					
		125		500		2000	
		$\alpha$	$\alpha S$	$\alpha$	$\alpha S$	$\alpha$	$\alpha S$
1	2	3	4	5	6	7	8
Потолок – бетон окрашенный	330	0,01	3,3	0,01	3,3	0,02	6,6
Стены с отметки 2 м – штукатурка по кирпичу	350	0,01	3,5	0,02	7	0,03	7,5
Стены до отметки 2 м – деревянная панель толщиной 5 – 10 мм с воздушным промежутком 50 мм	148	0,25	37	0,06	8,9	0,04	5,9
Пол – паркет по асфальту	300	0,04	12	0,07	21	0,06	18
Деревянная эстрада	45	0,1	4,5	0,1	4,5	0,08	3,6
Остекление	50	0,35	17,5	0,18	9	0,07	3,5
Добавочное звукопоглощение	1200	0,06	72	0,04	48	0,04	48

Таблица 12

## Определение эквивалентной площади звукопоглощения

Зрители и кресла	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Зрители на мягком кресле	0,25	0,30	0,40	0,45	0,45	0,40
То же, на жестком кресле	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35	0,35
Кресло деревянное жесткое	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
Кресло с обивкой сиденья и спинки искусственной кожей	0,08	0,10	0,12	0,10	0,10	0,08
Полумягкое кресло, обитое тканью	0,08	0,10	0,15	0,15	0,20	0,20
Мягкое кресло, обитое тканью с пористым наполнителем сиденья и спинки	0,15	0,20	0,20	0,25	0,30	0,30

При удельной площади  $1,5 \text{ м}^2/\text{чел}$ , в зале разместится 220 слушателей. При определении звукопоглощения полом взята вся его площадь (а не площадь, свободная от столов, стульев, сидящих людей); большее звукопоглощение компенсируется неучтенным поглощением звука столами. Приняты также несколько меньшие коэффициенты добавочного звукопоглощения.

Общая эквивалентная площадь звукопоглощения равна (см. табл. 5 и б) на частотах:

- 125 Гц:  $A_{\text{общ}} = 3,3 + 3,5 + 37 + 12 + 4,5 + 17,5 + 72 + 30,8 + 13,2 = 194 \text{ м}^2$ ;
- 500 Гц:  $A_{\text{общ}} = 168 \text{ м}^2$ ;
- 2000 Гц:  $A_{\text{общ}} = 173 \text{ м}^2$ .

Определим средний коэффициент звукопоглощения по формуле:  $\alpha_{\text{ср}} = A_{\text{общ}} / S_{\text{общ}}$  на частотах:

- 125 Гц:  $\alpha_{\text{ср}} = 194 / 1200 = 0,16$ ;
- 500 Гц:  $\alpha_{\text{ср}} = 168 / 1200 = 0,14$ ;
- 2000 Гц:  $\alpha_{\text{ср}} = 173 / 1200 = 0,14$ .

Так как  $\alpha_{\text{ср}} < 0,2$ , время реверберации определяем на частотах:

- 125 Гц:  $T = 0,163 V / A_{\text{общ}} = 0,163 (2475 / 194) = 2,1 \text{ с}$ ;
- 500 Гц:  $T = 0,163 (2475 / 168) = 2,4 \text{ с}$ ;
- 2000 Гц:  $T = 0,163 (2475 / 173) = 2,35 \text{ с}$ .

Фактическое время реверберации выше рекомендуемого, поэтому необходимо увеличить звукопоглощение в зале.

Зная  $T_{\text{нр}}$ , определяем  $\varphi(\alpha_{\text{ср}}^{\text{нр}})$  по формуле  $\varphi(\alpha_{\text{ср}}^{\text{нр}}) = \frac{0,163V}{T_{\text{нр}}S_{\text{общ}}}$ , а затем  $\alpha_{\text{ср}}^{\text{нр}}$ .

$$\text{Для частоты } 125 \text{ Гц } \varphi(\alpha_{cp}^{mp}) = \frac{0,163 \cdot 2475}{1,40 \cdot 1200} = 0,23.$$

Из таблицы в приложении 1 по  $\varphi(\alpha_{cp}^{mp})$  находим  $\alpha_{cp}^{mp}$ , равное 0,25.

$$\text{На частотах } 500 \text{ и } 2000 \text{ Гц } \varphi(\alpha_{cp}^{mp}) = \frac{0,163 \cdot 2475}{1,0 \cdot 1200} \cong 0,34; \alpha_{cp}^{mp} = 0,29.$$

Находим  $A_{общ} = \alpha_{cp}^{mp} S_{общ}$ : на частоте 125 Гц  $A_{общ}^{mp} = 0,25 \cdot 1200 = 300 \text{ м}^2$ ; на частотах 500 и 2000 Гц  $A_{общ}^{mp} = 0,29 \cdot 1200 = 348 \text{ м}^2$ .

Определяем, на сколько требуется изменить общую эквивалентную площадь звукопоглощения  $(A_{общ} - A_{общ}^{mp})$  на частотах:

- 125 Гц:  $300 - 194 = 106 \text{ м}^2$ ;
- 500 Гц:  $348 - 168 = 180 \text{ м}^2$ ;
- 2000 Гц:  $348 - 173 = 175 \text{ м}^2$ .

Если в соответствии с рис. 11 определить рекомендуемые зоны размещения звукопоглотителей, то окажется, что на боковых и задней стенах возможная площадь составит  $4 \times 20 \times 2 + 4 \times 7,5 = 190 \text{ м}^2$ , а на потолке –  $1 \times 20 \times 2 + 2(15 - 2) \times 7 = 131 \text{ м}^2$  (при ширине полос на потолке вдоль стен по 1 м); общая площадь  $190 + 131 = 321 \text{ м}^2$ .

Если разделить  $(A_{общ}^{mp} - A_{общ})$  на данную площадь, получим требуемый коэффициент звукопоглощения облицованной поверхности. На частотах 500 и 2000 Гц он составит около 0,6. Таким образом, для уменьшения времени реверберации требуется большая площадь эффективного звукопоглотителя.

Необходимо отметить, что значительные трудности с уменьшением времени реверберации происходят из-за чрезмерно большого объема залов. В нашем случае удельный объем составляет  $2475 / 220 = 11,2 \text{ м}^3/\text{чел}$ . Такой объем недопустимо высок для залов, предназначенных для речи. Удельный объем должен быть в пределах  $4 - 5 \text{ м}^3$  на одного человека. Поэтому желательно уменьшение высоты зала, что не только сократит время реверберации, но и улучшит распределение ранних отражений по залу.

**Пример 5.** Требуется разработать акустический проект зала драматического театра на 1000 мест.

Схема плана и продольного разреза зала показана на рис. 13. Объем зала (без сцены)  $V = 5300 \text{ м}^3$ ; удельный объем  $5,3 \text{ м}^3/\text{чел}$ ; удельная площадь  $0,7 \text{ м}^2/\text{чел}$ ; длина зала от задней стены до занавеса 28 м; ширина и высота в центральной части равны 22,0 и 10,0 м. Общая площадь внутренних поверхностей  $S_{общ} = 2250 \text{ м}^2$ .

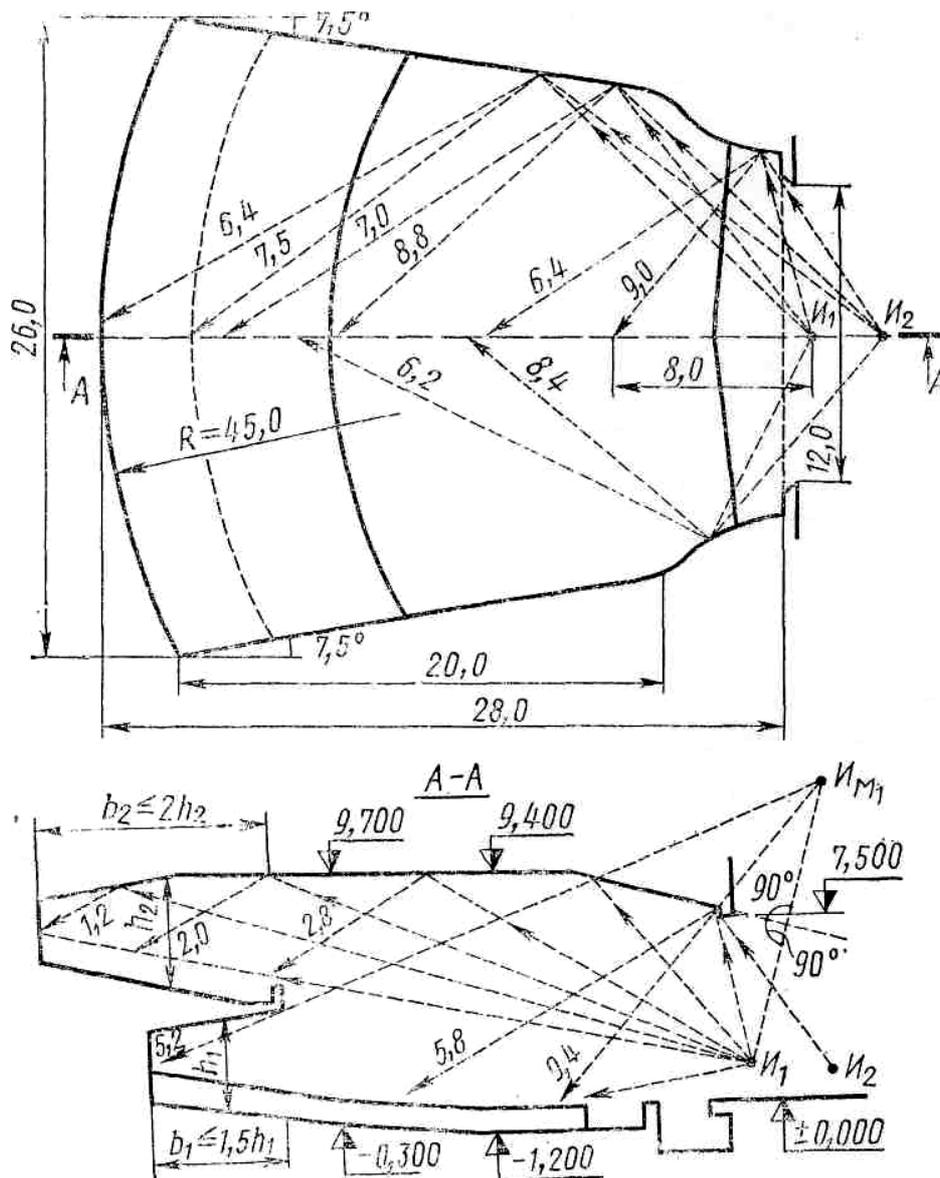


Рис. 13. Зал драматического театра на 1000 мест с построением звуковых отражений (размеры даны в метрах)

Форма зала выбрана исходя из следующих требований:

- обеспечить основные места в партере достаточно интенсивным прямым звуком и малозапаздывающими отражениями. Для театральных залов необходимо, чтобы на расстоянии около 8 м от источника звука на сцене разность хода отраженного и прямого звуков составляла от 7 до 10 м, что соответствует времени 0,02 и 0,03 с;
- обеспечить предельно высокую диффузность звукового поля.

Пол зала предусматривается с подъемом, обеспечивающим меньшие потери звука за счет экранирования впереди сидящими зрителями. Над порталом участок потолка сделан наклонным для равномерного распределения первых отражений. Для этих же целей ширина начальной части зала

сужается до ширины портала. Форма потолка и боковых стен выбрана таким образом, чтобы в переднюю часть зала поступали первые отражения даже при перемещении источника звука из точки  $I_1$  в точку  $I_2$ . Если бы эти поверхности были плоскими, то первые отражения могли бы поступить лишь во вторую половину зала.

На плане и разрезе зала показаны прямые и отраженные звуковые лучи и разница (в метрах) их прихода для нескольких точек. На расстоянии 8 м от источника разница находится в допустимом интервале 9 и 9,4 м. На больших расстояниях от источника звука эта разница уменьшается и составляет в среднем около 6 – 7 м.

На разрезе показан скос потолка над балконом; он необходим для отражения звука к последним рядам мест на балконе. Кроме того, уменьшается опасность неблагоприятного отражения от угла между потолком и задней стеной на авансцену. Для повышения диффузности звукового поля и ослабления возможного порхающего эха боковые стены предусматриваются непараллельными; угол составляет  $7,5^\circ$ . Предусмотрены также балкон и полукруглая форма задней стены. При большом радиусе кривизны ( $R = 45$  м) эта поверхность не будет фокусировать звук в партере. Кроме того, в плоскости задней стены находится балкон с большим количеством зрителей, имеющих значительное звукопоглощение, что приведет к рассеиванию звука, а не его концентрации.

Необходимое время реверберации на частотах 500 – 2000 Гц должно составить 1,25 с (рис. 4). Определим фактическое время реверберации в зале, сведя расчеты эквивалентной площади звукопоглощения в табл. 13 и 14.

Таблица 13

Определение эквивалентной площади звукопоглощения

Поверхности, материалы	Площадь, $\text{м}^2$	Эквивалентная площадь звукопоглощения, $\text{м}^2$ , на частотах, Гц					
		125		500		2000	
		$\alpha$	$\alpha S$	$\alpha$	$\alpha S$	$\alpha$	$\alpha S$
Потолок (штукатурка по металлической сетке)	600	0,02	12	0,06	36	0,05	30
Стены (штукатурка по кирпичу)	860	0,01	8,6	0,02	17,2	0,03	25,8
Пол, не занятый зрителями (паркет на асфальте)	210	0,04	8,4	0,07	14,7	0,05	12,6
Проем сцены	90	0,2	18,0	0,3	27,0	0,3	27,0
Внутренние поверхности оркестровой ямы (дерево)	100	0,1	10	0,1	10	0,1	10
Добавочное звукопоглощение	2250	0,06	135	0,03	67,5	0,03	67,5

Таблица 14

## Определение эквивалентной площади звукопоглощения

Зрители, кресла	Число $n$	Значение $A$ и эквивалентной площади звукопоглощения $A_n$ , $m^2$ , на частотах, Гц					
		125		500		2000	
		$A$	$A_n$	$A$	$A_n$	$A$	$A_n$
Сидящие зрители (70 % заполнения)	700 чел.	0,25	175	0,4	280	0,45	315
Свободные кресла (полумягкие с тканевой обивкой)	300 шт.	0,08	24	0,15	45	0,20	60

Для основных ограждающих поверхностей предварительно выбираем штукатурку по кирпичу и сетке; для пола – паркет на асфальте. Зал оборудуется полумягкими креслами с тканевой обивкой. Расчет производим для 70 % заполнения зала зрителями.

Общая эквивалентная площадь звукопоглощения равна на частотах:

$$- 125 \text{ Гц: } A_{\text{общ}} = 12 + 8,6 + 8,4 + 18 + 10 + 135 + 175 + 24 = 391 \text{ м}^3;$$

$$- 500 \text{ Гц: } A_{\text{общ}} = 498 \text{ м}^2;$$

$$- 2000 \text{ Гц: } A_{\text{общ}} = 523 \text{ м}^2.$$

Определим средний коэффициент звукопоглощения по формуле  $\alpha_{\text{ср}} = A_{\text{общ}}/S_{\text{общ}}$  на частотах:

$$- 125 \text{ Гц: } \alpha_{\text{ср}} = 391 / 2250 = 0,174;$$

$$- 500 \text{ Гц: } \alpha_{\text{ср}} = 498 / 2250 = 0,221;$$

$$- 2000 \text{ Гц: } \alpha_{\text{ср}} = 523 / 2250 = 0,232.$$

По табл. 2 находим  $\varphi_{\text{ср}}(\alpha_{\text{ср}})$  на частотах:

$$- 125 \text{ Гц: } \varphi(\alpha_{\text{ср}}) = 0,19;$$

$$- 500 \text{ Гц: } \varphi(\alpha_{\text{ср}}) = 0,25;$$

$$- 2000 \text{ Гц: } \varphi(\alpha_{\text{ср}}) = 0,26.$$

Определим время реверберации  $T$  на частотах:

$$125 \text{ Гц} - T = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,19} \cong 2,0 \text{ с}$$

$$500 \text{ Гц} - T = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,19} \cong 1,55 \text{ с};$$

$$2000 \text{ Гц} - T = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,26} \cong 1,50 \text{ с}.$$

Время реверберации несколько превышает рекомендуемое, при условии, что на частоте 125 Гц возможно увеличить  $T_{\text{тр}}$  на 40 %.

На рис. 13 показано возможное размещение звукопоглотителей на стенах и потолке. Примем в качестве звукопоглотителя для стен деревян-

ные панели (5 – 10 мм) с воздушным промежутком около 50 мм. Коэффициенты звукопоглощения на рассчитываемых частотах равны 0,25, 0,06 и 0,04. Площадь панелей на стенах составляет 180 м<sup>2</sup>, часть потолка площадью 80 м<sup>2</sup> облицовываем акустическими плитами «Акмигран» на отnose. Коэффициенты звукопоглощения этих плит составляют 0,25; 0,75 и 0,80.

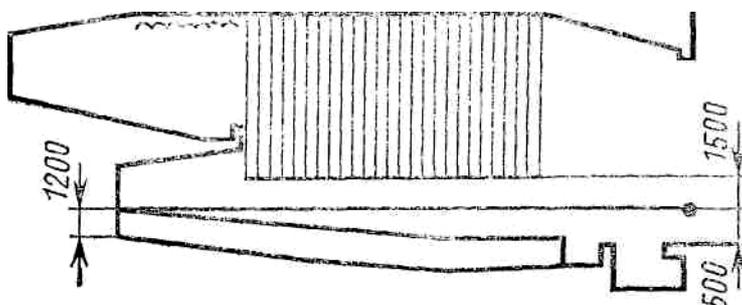


Рис. 13. Размещение звукопоглотителей в зале драматического театра на 1000 мест

Определяем добавляемую эквивалентную площадь звукопоглощения на частотах: 125 Гц (0,25 – 0,01) 180 + (0,25 – 0,02) – 80 = 62 м<sup>2</sup>. В скобках показана разность коэффициента звукопоглощения деревянных панелей и плит «Акмигран» и ранее учтенного коэффициента звукопоглощения стен и потолка:

- 500 Гц (0,06 – 0,02) 180 + (0,75 – 0,06) 80 = 62 м<sup>2</sup>;
- 2000 Гц (0,04 – 0,03) 180 + (0,80 – 0,06) 80 ≅ 66 м<sup>2</sup>.

Общая эквивалентная площадь звукопоглощения составит на частотах:

- 125 Гц:  $A_{общ} = 391 + 62 = 453 \text{ м}^2$ ;
- 500 Гц:  $A_{общ} = 498 + 62 = 560 \text{ м}^2$ ;
- 2000 Гц:  $A_{общ} = 523 + 66 = 589 \text{ м}^2$ .

Значения  $\alpha_{ср}$  на рассчитываемых частотах равны 0,20; 0,25; 0,26, а  $\varphi(\alpha_{ср})$  – 0,22; 0,29; 0,30.

Время реверберации равно на частотах:

$$125 \text{ Гц} - E = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,22} \cong 1,75 \text{ с};$$

$$500 \text{ Гц} - T = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,29} \cong 1,30 \text{ с};$$

$$2000 \text{ Гц} - T = 0,163 \frac{5300}{2250 \cdot 0,30} \cong 1,30 \text{ с}.$$

Расчетные значения времени реверберации вполне удовлетворительны, так как отклоняются от рекомендуемых менее чем на 10 %.

## РАСЧЕТНЫЕ ЗАДАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

№ п/п		Варианты		
		1	2	3
1	Назначение зала: универсальный лекционный кинотеатр, конференцзал	*	*	*
2	Вместимость (№ чел)	500	550	600
3	Удельный объем на одного зрителя ( $V_{уд}$ , м <sup>3</sup> /чел)	7	6	8
4	Форма зала в плане выдается преподавателем выбирается студентом	*	*	*
5	Глубина сцены, м	5	3	4
6	Высота подъема сцены, м	0,6	0,6	0,8
7	Высота подъемов зрительных рядов (начиная с 5-го ряда), м	0,2	0,2	0,2
8	Удаление первого ряда от сцены, м	2	1,5	2
9	Расстояние между рядами, м	0,8	0,9	0,9
10	Ширина зрительных мест. М	0,5	0,5	,05
11	Ширина проходов, м	1,5	1,2	1,5
12	Количество дверей в зале	4	4	4
13	Площадь остекления (от площади зрительских мест $F_{зр}$ )	$1/3F_{зр}$	$1/4F_{зр}$	$1/3F_{зр}$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Коэффициенты звукопоглощения некоторых материалов и конструкций

Материалы и конструкции	Коэффициент звукопоглощения для частоты, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Обычные материалы и конструкции						
1. Кирпичная кладка без расшивки швов	0,15	0,19	0,29	0,28	0,38	0,46
2. То же, с расшивкой швов	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06
3. Стены оштукатуренные, окрашенные клеевой краской	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
4. То же, окрашенные масляной краской	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
5. Штукатурка по металлической сетке с воздушной полостью позади	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
6. Бетон с железнением поверхности	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
7. Мрамор, гранит и другие каменные породы шлифованные	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
8. Травертин	0,02	0,03	0,03	0,03	0,035	0,04
9. Метлахская плитка	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
10. Панель деревянная толщиной 5-10 мм с воздушной прослойкой 50-150 мм	0,3	0,15	0,06	0,05	0,04	0,04
11. Плиты древесно-стружечные неокрашенные толщиной 20 мм с воздушной прослойкой 50-150 мм	0,1	0,08	0,05	0,05	0,08	0,1
12. Плиты твердые древесно-волокнистые толщиной 4 мм, плотностью 1000 кг/м <sup>3</sup> , с воздушной прослойкой 50-150 мм	0,3	0,16	0,08	0,05	0,04	0,08
13. Штукатурка гипсовая сухая толщиной 10 мм с воздушной прослойкой 50-150 мм	0,3	0,25	0,1	0,08	0,05	0,04
14. Переплеты оконные застекленные	0,3	0,2	0,15	0,1	0,06	0,04
15. Светопрозрачные ограждения из стеклоблоков	0,01	0,02	0,02	0,06	0,06	0,06
16. Пол паркетный	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
17. Пол дощатый на лагах	0,1	0,1	0,1	0,08	0,08	0,09
18. Линолеум на твердой основе	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
19. Ковер шерстяной толщиной 9 мм по бетону	0,09	0,08	0,21	0,26	0,27	0,37
20. То же, на войлочной подкладке толщиной 3 мм	0,11	0,14	0,37	0,43	0,27	0,3
21. Портьеры хлопчатобумажные на подкладке со складками, поверхностная плотность ткани 0,5 кг/м <sup>2</sup>	0,05	0,3	0,45	0,7	0,65	0,5
22. Портьеры плюшевые со складками, поверхностная плотность ткани 0,65 кг/м <sup>2</sup>	0,15	0,35	0,55	0,7	0,7	0,65
23. Фибролит толщиной 50 мм с воздушной прослойкой 50-100 мм	0,2	0,45	0,45	0,5	0,6	0,65
24. Вентиляционные решетки	0,3	0,42	0,5	0,5	0,5	0,51
25. Вода в ванне бассейна	0,01	0,01	0,013	0,015	0,02	0,025
26. Проем сцены, оборудованной декорациями	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
27. Киноэкран	0,3	–	0,4	–	0,4	–

Покрытия полов спортивных залов						
28. «Тарафлекс. Спорт М»	0,02	0,03	0,03	0,08	0,06	0,03
29. Искусственная трава фирмы «Полиграс»	0,07	0,07	0,075	0,1	0,39	0,52
30. «Астротурф»	0,1	0,15	0,3	0,5	0,7	0,5
31. «Пуластик»	0,05	0,12	0,2	0,2	0,15	0,1
32. «Спортан» пористый	0,05	0,06	0,07	0,1	0,3	0,5
33. «Спортан»	0,04	0,05	0,08	0,18	0,2	0,3
34. «Риздор»	0,02	0,03	0,04	0,18	0,25	0,17
35. «Тарган»	0,02	0,03	0,06	0,1	0,18	0,17
Специальные звукопоглощающие материалы и конструкции						
36. плиты гипсовые перфорированные с пористым наполнителем, размер 810×810×26 мм: без воздушной прослойки	0,05	0,2	0,45	0,75	0,55	0,35
с воздушной прослойкой, мм:						
50	0,05	0,4	0,75	0,55	0,55	0,3
100	0,15	0,6	0,75	0,55	0,5	0,3
200	0,25	0,65	0,65	0,6	0,55	0,3
37. Плиты пористые акустические «Акмигран», размер 300×300×20 мм:						
без воздушной прослойки	0,05	0,15	0,5	0,65	0,65	0,7
с воздушной прослойкой, мм:						
50	0,15	0,55	0,55	0,65	0,65	0,7
100	0,25	0,55	0,55	0,65	0,65	0,7
200	0,35	0,6	0,6	0,65	0,7	0,75
38. Плиты «Силакпор»:						
без воздушной прослойки	0,2	0,5	0,65	0,6	0,6	0,6
с воздушной прослойкой, 100 мм:	0,5	0,7	0,6	0,55	0,55	0,6
39. Минские плиты А-1:						
без воздушной прослойки	0,1	0,3	0,6	0,7	0,8	0,8
с воздушной прослойкой, 200 мм:	0,4	0,65	0,65	0,7	0,75	0,75
40. Плиты «Москва»:						
без воздушной прослойки	0,1	0,25	0,8	0,6	0,5	0,35
с воздушной прослойкой, 100 мм:	0,2	0,6	0,6	0,5	0,35	0,3
41. Плиты «Мелодия»:						
без воздушной прослойки	0,15	0,25	0,8	0,4	0,2	0,2
с воздушной прослойкой, 100 мм:	0,25	0,5	0,6	0,45	0,3	0,3
42. Фибролит толщиной около 50 мм с воздушной прослойкой 50-100 мм	0,2	0,45	0,45	0,5	0,6	0,65
43. Слой пористого звукопоглотителя толщиной не менее 100 мм, покрытый стеклотканью или мешковиной и деревянными рейками шириной 20-25 мм, толщиной 10-12 мм и расстоянием между ними 15-20 мм	0,4	0,7	0,8	0,8	0,75	0,65
44. То же, вместо реек гипсовые перфорированные плиты размером 400×400×10 и 500×500×10 мм, с отверстиями диаметром 10 мм и шагом 24 мм	0,4	0,7	0,75	0,6	0,45	0,3

ФОРМУЛЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

*Акустика* – область естествознания, в которой изучаются звуковые волны.

*Архитектурная акустика* – наука, изучающая физические и физиологические характеристики звука и шума, закономерности их распределения на территориях и в помещениях, архитектурно-планировочные и конструктивные способы усиления и подавления звука и шума.

*Звуковая волна* – процесс распределения колебательного движения в среде.

*Звуковые волны* – упругие волны с частотами  $f \sim 16 - 20000$  Гц, распространяющиеся в среде и воспринимаемые органами слуха человека. В жидкостях и газах волны только продольные, в твердых телах – только продольные и поперечные. Основное свойство всех волн – перенос энергии без переноса вещества.

*Фронт звуковой волны* – поверхность, проходящая через частицы среды, совершающие колебания в одной и той же фазе. Различают три вида фронта волны – плоский, шаровой (сферический) и цилиндрический.

*Источник звука* – любое тело, колеблющееся в упругой среде со звуковой частотой.

*Скорость звука* в твердых изотропных средах:

$$v_{\text{прод}} = \sqrt{E/\rho} \qquad v_{\text{попер.}} = \sqrt{G/\rho}$$

где  $E$  – модуль упругости (Па);

$G$  – модуль сдвига (Па);

$\rho$  – плотность среды ( $\text{кг/м}^2$ ).

*Скорость звука* в воздухе:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

где  $\gamma = C_p / C_v$  отношение молярных теплоемкостей газа при постоянном давлении и объеме;

$R$  – молярная газовая постоянная (ДЖ/мольК);

$T$  – термодинамическая температура (К);

$M$  – молярная масса (моль).

*Скорость звука* в воздухе при 20 °С,  $c = 340$  м/с.

*Звуковое давление*  $p$  (Н/м<sup>2</sup>) – скалярная характеристика изменения состояния среды в звуковом поле, разность между мгновенным значением полного давления и средним давлением, которое наблюдается в среде при отсутствии звукового поля. В фазе сжатия  $p > 0$ , в фазе разрежения  $p < 0$ .

*Длина звуковой волны*  $\lambda$  (м) – расстояние, измеренное вдоль распространения звуковой волны между двумя ближайшими точками звукового поля, в которых фаза колебания частиц среды одинаковая

Связь длины волны, частоты и скорости звука в изотропных средах

$$\lambda f = c.$$

*Звуковая мощность источника*  $P$  (Вт) – скалярная характеристика источника звука, количество звуковой энергии, излучаемой в единицу времени.

*Звуковая мощность источника шума:*

$$L_p = 10 \lg(P/P_0)$$

где  $P_0$  – пороговое значение звуковой мощности  $P_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>.

*Плотность звуковой энергии*  $D$ , (Дж/м<sup>3</sup>) – скалярная характеристика звукового поля, равная звуковой энергии, содержащейся в единице объема среды:

$$D = \frac{p^2}{\rho c^2},$$

где  $p$  – звуковое давление (Па);  
 $\rho$  – плотность среды (кг/м<sup>3</sup>);  
 $c$  – скорость звука (м/с).

*Поток звуковой энергии* (звуковая мощность, сила звука, плотность потока энергии)  $I$  (Вт/м<sup>2</sup>) – поток звуковой энергии через поверхность площадью  $S$ , перпендикулярную направлению распространения звука.

*Интенсивность звука (сила звука)*  $I$  – энергетическая характеристика, средняя по времени энергия, переносимая звуковой волной в единицу времени сквозь площадку, ориентированную перпендикулярно направлению распространения волны.

Для плоского звукового поля  $I = p^2 / \rho c$ .

Для диффузного звукового поля  $I = p^2 / 4\rho c$ .

Для сферического звукового поля на расстоянии  $r$  от точечного источника звука звуковой мощностью  $P$ :

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}.$$

*Волновое сопротивление* (акустическое сопротивление среды, импеданс)  $\rho c$  – отношение звукового давления на поверхности к нормальной составляющей скорости звука около нее. Для воздуха

$$\rho c = 407 \text{ рел (кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}) \text{ (41 МПа} \cdot \text{с/м)}$$

*Уровень интенсивности звука*  $L_I$

$$L_I = k \lg \frac{I}{I_0},$$

где  $I$  – интенсивность исследуемого звука;

$I_0$  – стандартный порог слышимости ( $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>) (пороговая интенсивность)

$k$  – коэффициент пропорциональности, если  $L_I$  выражают в децибелах, то значение  $k = 10$ .

$$\text{Уровень звукового давления } L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 10 \lg \left( p^2 / p_0^2 \right) = 20 \lg \left( p^2 p_0 \right).$$

*Уровень звукового давления* равен уровню интенсивности звука  $L_I$  при значении  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Н/м<sup>2</sup>, соответствующей пороговой интенсивности  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>.

*Показатель направленности ПН* – характеристика неравномерности излучения источника звука в различных направлениях:

$$ПН = L / \bar{L},$$

где  $L$  – уровень звукового давления, измеренный в заданном направлении на фиксированном расстоянии от источника, дБ;

$\bar{L}$  – усредненный по всем направлениям уровень звукового давления на том же фиксированном расстоянии.

*Частотный спектр звука* – распределение звуковой энергии (звукового давления, звуковой мощности) по частотному диапазону.

$$\text{Средняя частота полосы } f_{cp} = \sqrt{f_1 \cdot f_2},$$

где  $f_1$  – нижняя граничная частота спектра;

$f_2$  – верхняя граничная частота спектра.

*Уровень громкости (фон)* – физиологическая характеристика уха человека.

*Фон* – внесистемная единица уровня громкости. 1 фон равен уровню громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромко с ним звука стандартного чистого тона ( $f = 1000$  Гц) равен 1дБ.

1 фон – это 1дБ звукового давления тона частотой 1кГц с поправкой на частотную характеристику уха. Для звука стандартного тона ( $f = 1000$  Гц) уровень громкости в фонах совпадает с уровнем звукового давления в дБ.

*Эквивалентный уровень звука  $L_A$  (дБА)* – характеристика непостоянного звука, средняя энергия которого равно уровню постоянного широкополосного неимпульсного звука.

*Уровень звукового давления* в помещении с источником шума ориентировочно равен

$$L = L_p - 10 \lg A + 6,$$

где  $L_p$  – уровень звуковой мощности источника шума, дБ;  
 $A$  – общее звукопоглощение в помещении.

*Время реверберации  $T$  (с)* – интервал времени после выключения источника звука, в течение которого плотность звуковой энергии уменьшается в  $10^6$  раз. При невысоких значениях среднего коэффициента звукопоглощения ( $\alpha < 0,2$ ) время реверберации вычисляется по формуле Сэбина:

$$T = \frac{0,163}{\alpha S} = \frac{0,163V}{A_{общ}},$$

где  $\alpha$  – средний коэффициент звукопоглощения;  
 $S$  – общая площадь отражающих поверхностей, м<sup>2</sup>;  
 $V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;  
 $A_{общ} = \alpha S$  – общее звукопоглощение в помещении.

Время реверберации зала  $T$  (с) на частотах до 1000 Гц вычисляется по формуле Эйринга:

$$T = \frac{0,163V}{S_{общ} \cdot \Phi(\bar{\alpha})},$$

где  $V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;  
 $S_{общ}$  – общая площадь ограждающих поверхностей;  
 $\Phi(\bar{\alpha}) = -\ln(1 - \bar{\alpha})$  – функция среднего коэффициента звукопоглощения  $\bar{\alpha}$ .

Время реверберации на частотах выше 1000 Гц вычисляется по формуле:

$$T = \frac{0,163V}{S_{\text{общ}} \cdot \bar{\alpha} + 4mV},$$

где  $m$  ( $\text{м}^{-1}$ ) – коэффициент, учитывающий поглощение звука в воздухе и зависящий от температуры и влажности воздуха.

*Шум* – звуковые колебания, выходящие за рамки звукового комфорта, то есть всякий неприятный, нежелательный звук или совокупность звуков, мешающих восприятию полезных сигналов, нарушающий тишину, оказывающих вредное воздействие на организм человека, снижающий его работоспособность. Шум обладает сплошным спектром или линейчатым спектром с неорганическими составляющими. Различают широкополосный, тональный и импульсный шум.

*Расчетная точка* – точка в помещении или на территориях, для которой производится акустический расчет.

*Коэффициент звукопроницаемости  $\tau$*  – безразмерная характеристика звукоизоляционных свойств какого-либо ограждения; отношение звуковой мощности, прошедшей через ограждение, к звуковой мощности, попадающей на него:

$$\tau = P_{\text{пр}} / P_{\text{пад}} = p_{\text{пр}}^2 / p_{\text{пад}}^2$$

где  $P_{\text{пр}}, P_{\text{пад}}$  – соответственно прошедшая и падающая звуковая мощность;  
 $p_{\text{пр}}, p_{\text{пад}}$  – соответственно звуковое давление в прошедшей и падающей волнах.

*Звукоизолирующая способность* ограждений от воздушного шума – характеристика ограждения, находящегося в диффузном звуковом поле.

$$R = 10 \lg(1/\tau), \text{ (дБ)}$$

где  $\tau$  – коэффициент звукопроницаемости.

*Звукоизолирующая способность* ограждения от воздушного шума с учетом косвенной передачи звука через прилегающие ограждения

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg(S/A),$$

где  $L_1$  – средний уровень звукового давления в помещении с источником звука (дБ);

$L_2$  – то же, в изолируемом помещении (дБ);

$S$  – площадь ограждения, разделяющего помещения,  $\text{м}^2$ ;

$A$  – общее звукопоглощение изолируемого помещения,  $\text{м}^2$ .

*Закон массы:*

На частотах выше первых двух-трех частот собственных колебаний плоского ограждения его звукоизолирующие качества определяются массой единицы площади ограждения:

$$R = 20 \lg(mf) - 47,5,$$

где  $m$  – масса единицы площади ограждения (кг/м<sup>3</sup>);  
 $f$  – частота колебаний, Гц

*Коэффициент звукоотражения* – безразмерная характеристика поверхности материала и конструкции

$$\beta = E_{\text{отр}} / E_{\text{пад}}$$

где  $E_{\text{отр}}$ ,  $E_{\text{пад}}$  – соответственно энергия отраженной и падающей звуковой волны.

*Коэффициент звукопоглощения* – безразмерная характеристика поверхности материала и конструкции:

$$\alpha = \frac{E_{\text{пад}} - E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}} = 1 - \beta$$

При падении звуковых волн на открытый проем, звуковая энергия не отражается и коэффициент звукопоглощения  $\alpha = 1$ .

*Диффузность звукового поля* – акустическая характеристика звукового однородного и изотропного поля в помещении, то есть во всех точках поля усредненные во времени уровень звукового давления и поток приходящий по любому направлению звуковой энергии постоянны.

*Слышимость речи* – субъективный фактор, определяющий качество передачи речи в помещении

$$P_c = 96k_1k_R,$$

где  $P_c$  – слоговая разборчивость, %;  
 $k_1$  – коэффициент, учитывающий влияние уровней речи и шума.  
 $k_R$  – коэффициент учитывающий реверберации.

*Гулкость зала* – характеристика длительности процесса затухания звука на месте прослушивания. Объективный показатель гулкости – стандартное время реверберации.

*Эхо* – заметное на слух повторение прямого звука.

*Порхающее эхо* – эффект, возникающий при многократном отражении звука между параллельными гладкими поверхностями (обычно между боковыми стенами помещения).

## СОДЕРЖАНИЕ

I. Архитектурная акустика .....	3
Тема курсовой работы:	
1.1. Шумовой режим застройки .....	3
1.1.1. Выбор и обоснование метода определения акустических характеристик автотранспортных потоков .....	4
1.1.2. Теоретические основы расчета шумового режима застройки .....	6
1.1.3. Примеры расчетов .....	14
Расчетные задания к курсовой работе.....	22
Тема курсовой работы:	
1.2. Акустика помещения большой вместимости. проектирование залов с естественной акустикой .....	23
1.2.1. Основные характеристики и методы расчета звукового поля.....	24
1.2.2. Примеры расчетов .....	30
Расчетные задания к курсовой работе.....	41
Приложение 1 .....	42
Приложение 2 .....	44

*Учебное издание*

СЕРИЯ «ИНТЕГРАТИВНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ»

**АРХИТЕКТУРНАЯ ФИЗИКА**

**РАЗДЕЛ «АРХИТЕКТУРНАЯ АКУСТИКА»**

Методические указания и расчетные задания к курсовой работе  
для студентов специальности 1-69 01 01 «Архитектура»

Составитель

ОЩЕПКОВА Нонна Владимировна

КАЧАНОВ Андрей Николаевич

Редактор *Ю.В. Мацук*

---

Подписано в печать 11.09.07. Формат 60x84 1/16. Гарнитура Таймс. Бумага офсетная.  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 2,55. Уч.-изд. л. 1,76. Тираж 50. Заказ 1253.

---

Издатель и полиграфическое исполнение –  
Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ № 02330/0133020 от 30.04.04    ЛП № 02330/0133128 от 27.05.04  
211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29