МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФГБОУ ВПО
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА «ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ»

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКУСТИКИ ЗРИТЕЛЬНЫХ ЗАЛОВ

Методические указания
(дополненные и переработанные)

к выполнению расчетно-графических и курсовых работ
по курсу «Архитектурная акустика»
для студентов специальностей
270114.65 «Проектирование зданий»,
070603.65 «Искусство интерьера»

Казань – 2013 г.

Составитель: профессор Удлер Евгений Михайлович

Одобрено на заседании кафедры
Проектирование зданий
Протокол №____ от ___ _____ 2013 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

Теоретические основы акустического проектирования залов 5

Цели и средства архитектурной акустики 5

Процесс реверберации в залах 7

Влияние формы зала на акустику 9

Применение звукоусиления 11

Практические рекомендации по проектированию 13

1. Проектирование формы зала

Расчет площади и рекомендуемые пропорции зрительного зала 13

Размещение зрительских мест и эвакуационных проходов 14

Вычисление требуемого объема зала 16

Построение профиля пола в зале 17

Построение балконов и галерей 19

Построение профиля потолка 20

Проверка применимости геометрической акустики 22

Определение структуры ранних отражений в зале 23

2. Проектирование отделки зала 24

Определение границ зон ранних отражений на потолке 24

Границы ранних отражений на боковых стенах 25

Выбор зон и подбор материалов акустической отделки зала 26

Расчет эквивалентной площади звукопоглощения в зале 27

Вычисление времени реверберации в зале 29

Подбор параметров пластической обработки поверхностей в зале 31

Приложения 1. Акустические свойства материалов и конструкций **33**

Приложение 2. Значение функции $\varphi(\alpha) = -\ln(1-\alpha)$ 36

Приложение 3. Содержание работ 37

Приложение 4. Задание на выполнение работ по курсу «Архитектурная акустика» 38

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания являются переработанным и актуализованным изданием одноименных методических указаний для студентов специальности «архитектура», разработанных автором и изданных офсетом по решению РИО Казанского инженерно-строительного института от 22.04.1980 г. [1].

Рабочим учебным планом ГОС-2 специальности 270114.65 по дисциплине «Архитектурная акустика» предусмотрено выполнение двух расчетно-графических работ:

РГР-1 – «Акустическое проектирование формы зрительного зала» и

РГР-2 – «Акустическое проектирование интерьера зрительного зала**».**

Рабочим учебным планом ГОС-2 специальности 070603.65 по дисциплине «Архитектурная акустика» предусмотрено выполнение курсовой работы «Акустическое проектирование интерьера зрительного зала».

В качестве вариантов заданий для студентов выступает различное функциональное назначение зрительного зала и количество зрительских мест, определяющие акустические требования к залу. Ниже приведены возможные варианты:

Зал оперного театра
Зал театра оперетты
Зал драматического театра
Зал кукольного театра
Концертный зал
Лекционный зал
Многоцелевой (универсальный) зал
Конференц-зал
Зал камерной музыки
Концертный зал консерватории
Зал хоровой и органной музыки
Зал театра юного зрителя
Зал эстрадной музыки
Зал симфонической музыки
Студия звукозаписи
Телевизионные студии (музыкальные, драматические, новостные и т.д.)

Теоретические основы акустического проектирования залов

Хорошая акустика как одно из основных требований к зрительным залам неразрывно связана с их архитектурой – формой, размерами, отделкой, заполнением и оборудованием.

Все современные залы по акустическому оборудованию можно разделить на три группы:

- Залы с естественной акустикой
- Залы с естественной акустикой и системой звукоусиления
- Залы со звуковоспроизводящей аппаратурой (искусственной акустика)

Цели и средства архитектурной акустики

Цель архитектурной акустики - обеспечение архитектурно-строительными средствами хорошей слышимости естественной речи и музыки, а также звуков, воспроизводимых электроакустической аппаратурой.

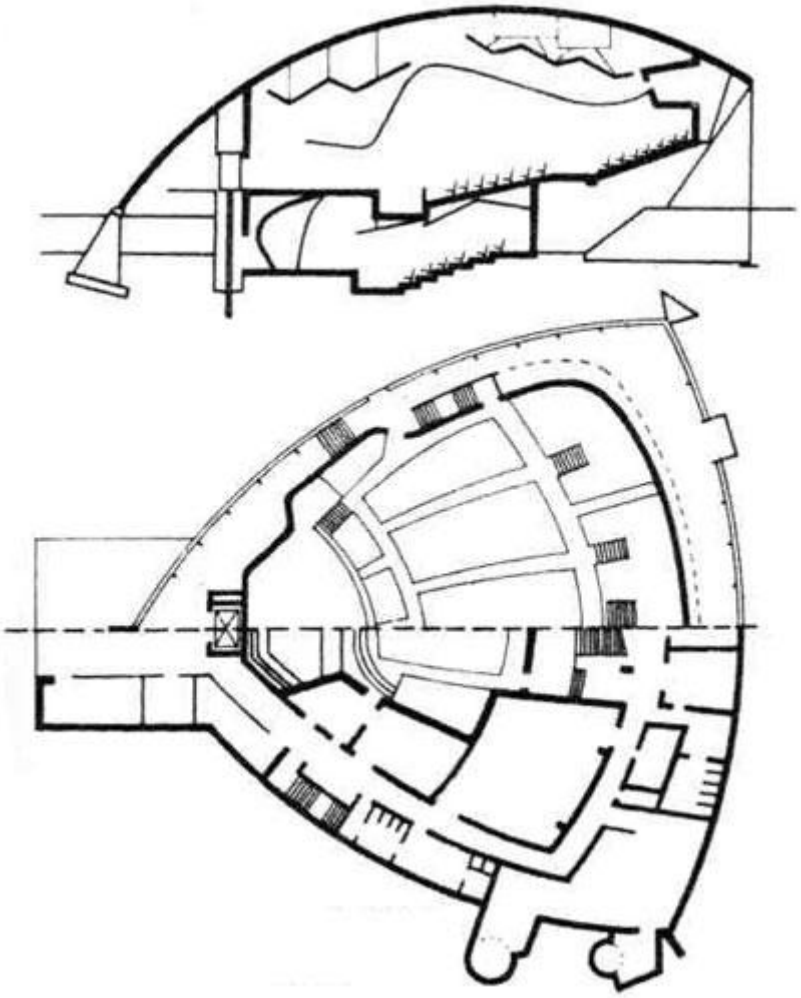


Рис. 1. Аудитория в Кембридже, штат Массачусетс, США. Архитектор Сааринен: разрез и план на уровне верхнего и нижнего зала.

Рис.2 Интерьер современного зала. Концерт-холл в Сегерстоне (США)

Рис.3. резонаторы и поглотители в студии звукозаписи

При проектировании залов к таким средствам относятся (см. рис.1,2,3):

- размеры и форма залов,
- членение поверхностей стен и потолков различными объемными элементами,

•обработка ограждений материалами, отражающими или поглощающими звук.

•размещение в залах специальных звукопоглощающих и резонирующих конструкции, акустических диффузоров и т.д.

•применение мебели с определенными звукопоглощающими характеристиками.

О процессе реверберации в залах

Одним из важнейших критериев, определяющих хорошую слышимость в помещениях, является стандартное время реверберации. Под реверберацией понимают процесс затухания звука после выключения его источника. Пример графика процесса затухания звуковой энергии приведен рис.4.

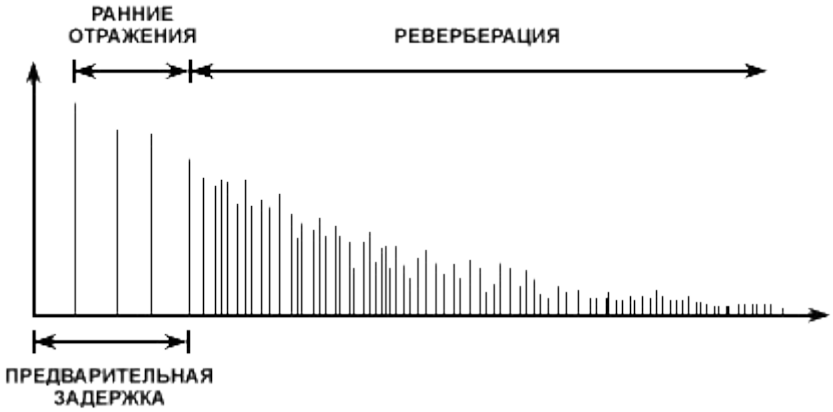


Рис.4. График затухания звука в помещении после отключения источнка

Этот процесс происходит из-за многократных отражениях звука от внутренних поверхностей в закрытых помещениях (рис.5).

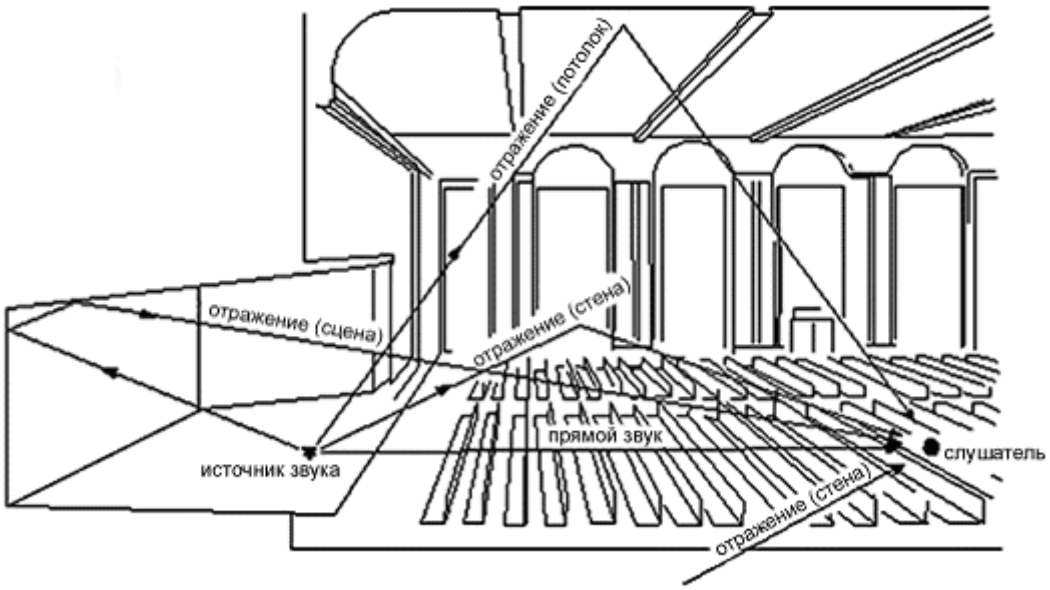


Рис.5. Формирование звукового поля в зале за счет отражений от ограждений

За счет реверберации звук в помещении становится громче и продолжительней, чем в открытом пространстве. Увеличение громкости играет положительную роль, так как появляется возможность строить залы большой вместимости без применения специальных систем звукоусиления.

Увеличение продолжительности звучания в известной мере также играет положительную роль при исполнении мелодичной музыки, придавая ей новые оттенки, но может оказаться и вредным при звучании речи или ритмичной музыки, так как снижает разборчивость.

Для количественной оценки реверберации введено понятие стандартного времени реверберации – Тс. Это время, за которое энергия звука уменьшается в 10 раз (что соответствует уменьшению уровня звукового давления на 60 дБ). Стандартное время реверберации может быть рассчитано по формуле У.Сэбина (1) или Эйринга(2):

$$Tc = \frac{0.161 \times V}{Ao} \qquad (1)$$

$$T = \frac{0.163 \times V}{S \times \varphi(\alpha) + n \times V} \qquad (2)$$

Здесь: V – объем зала в куб.м.

S- площадь поверхностей ограждений в кв.м.

Ао – общее звукопоглощение в зале (ЭПЗ)

n- коэффициент поглощения звука воздухом

α – средний коэффициент звукопоглощения в зале

$\varphi(\alpha) = -\ln(1-\alpha)$

Рис.6. Оптимальные значения времени реверберации в залах

Формула Сэбина справедлива при среднем коэффициенте звукопоглощение не более 0,2. При больших значениях следует

пользоваться формулой Эйринга. При этом учитывать поглощение воздухом следует только на частотах выше 2000 гц. Как видно из формулы (1), время реверберации помещения зависит от его объема и звукопоглощения поверхностей и находящихся в нем предметов. Поэтому оно может регулироваться архитектурно-строительными средствами.

Опытным путем определены оптимальные значения времени реверберации для различных по назначению и объему залов. Их можно определить по графику, приведенному в качестве примера на рис.6.

О влиянии формы зала на акустику

Значительное влияние на качество звучания оказывает соотношение громкости сигнала, идущего от источника звука, и сигналов, полученных в результате первых (ранних) отражений от внутренних поверхностей помещения. Так, если отраженный звук будет подходить к слушателю с запаздыванием по отношению к прямому сигналу на 100 милисекунд для продолжительных сигналов и 50 мсек - для коротких сигналов, то слушатель будет воспринимать отраженный сигнал как эхо. Чтобы этого не происходило, необходимо ограничить размеры зала или разместить на удаленных отражающих поверхностях эффективные поглотители звука.

Важной акустической характеристикой зала является степень диффузности звукового поля. Диффузность достигается формой зала, сочетанием звукопоглощающих и отражающих поверхностей, профилировкой (пластической обработкой) отражающих поверхностей.

Общая форма зала определяется на основе принципов геометрической акустики (см.рис.7).

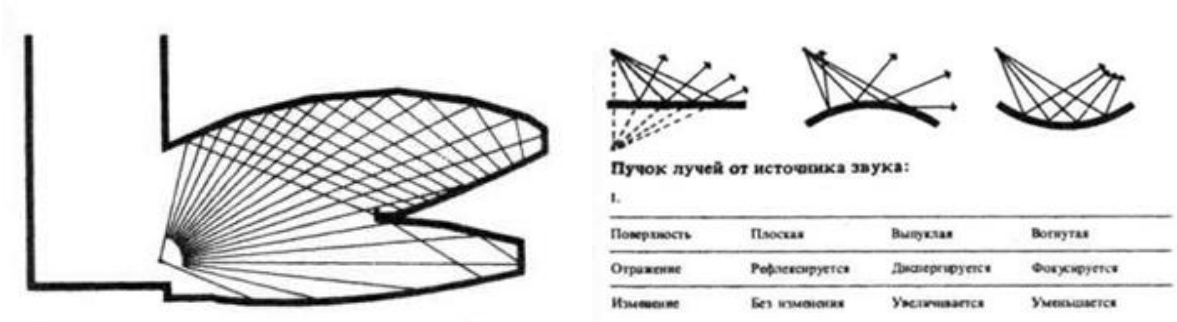


Рис.7. Применение геометрической акустики при проектировании формы зала

Геометрическая акустика использует представление, согласно которому звук распространяется от источника к слушателю по прямой линии (лучу) и угол падения его на какую-либо поверхность равен углу отражения.

Если размеры поверхности или размеры ее членений близки к длине волны, - происходит рассеянное отражение звука. Если размеры членения значительно меньше длины волны, происходит направленное отражение от поверхности, как если бы она была гладкой. Вогнутая поверхность создает фокусирование звука. Такие поверхности стен или потолков бывают в залах круглой и овальной формы и при сводчатых потолках. Во всех этих

случаях вблизи центров кривизны вогнутых поверхностей сильно нарушается диффузность звукового поля, что приводит к значительному ухудшению качества звучания. Поэтому с акустической точки зрения использование вогнутых поверхностей нежелательно. Если этого избежать не удается, то следует учитывать недопустимость того, чтобы центры кривизны приходились на поле зрительских мест.

Снизить отрицательный эффект вогнутых поверхностей можно их раскреповкой, размещением на них различных декоративных деталей, рассеивающих звук, или звукопоглощающей обработкой. При этом следует учитывать, что выпуклые поверхности (колонны, пилястры, крупные лепные украшения, люстры) рассеивают звук, что повышает диффузность звукового поля в помещении.

При проектировании формы зала следует избегать параллельности противоположных стен, пола и потолка. Это может привести к так называемому порхающему эху - резонансному явлению, при котором в различных местах зала возникает неустойчивое во времени усиление громкости сигнала, как показано нарис.8.

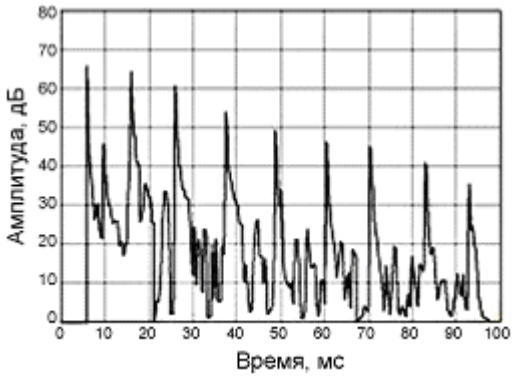


Рис.8. Структура звуковых колебаний при образовании порхающего эха

В залах большой вместимости и внутреннего объема обеспечение оптимального времени реверберации достигается размещением значительного количества звукопоглощающей отделки и конструкций. Наиболее подходящие места размещения звукопоглощения - задняя стена и треть поверхности примыкающих к ней боковых стен и потолка, поскольку первые отражения от этих поверхностей использовать для усиления звука неэффективно. Эти отражения приходят с большим запаздыванием по сравнению с прямым сигналом и приводят к снижению его разборчивости.

Стены и потолок вблизи сцены или эстрады должны хорошо отражать звук в глубину зала. Поэтому они обрабатываются плотными материалами. Их форма и ориентация относительно источника звука должны обеспечивать первые отражения, направленные к зрителям, наиболее удаленным от сцены. Пример такого решения для концертного зала с эстрадой – акустической раковиной показан на рис.9.

В аудиториях, конференц-залах, залах драматических театров основное значение имеет разборчивость речи. Разборчивость оценивается артикуляцией, которая выражается в процентах правильно понятых слов или слогов по отношению ко всем произнесенным.

Хорошие акустические качества залов могут быть достигнуты только при низких уровнях проникающих извне шумов. Для достижения этого должны быть приняты планировочные меры, заключающиеся в удалении от зрительных залов всех помещений с повышенными источниками шума (системами кондиционирования воздуха, насосами, лифтами, оборудованием мастерских).

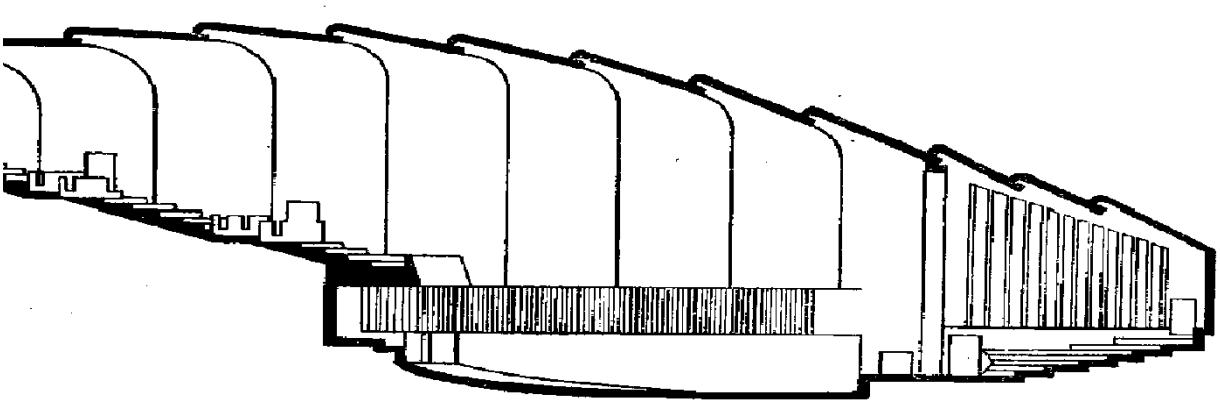


Рис.9. Разрез концертного зала с акустической раковиной

Здания театров, студий желательно удалять не менее чем на 100 м от линий железных дорог, метрополитена, автомагистралей. Ограждающие конструкции залов должны иметь повышенную степень звукоизоляции.

О применении звукоусиления

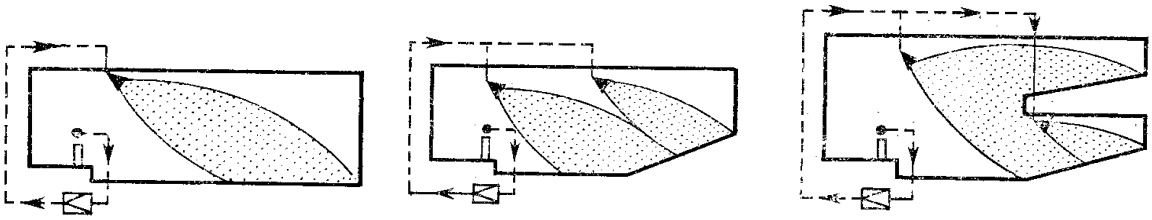


Рис.10. Схемы звукоусиления в концертных залах: сосредоточенная (слева) и распределенные

Размеры залов с естественной акустикой, ограниченны возможностями человеческого голоса и музыкальных инструментов и не могут превышать, как правило, 30 м в длину. При больших размерах зала необходимо применение электроакустических систем звукоусиления. Простейшие системы звукоусиления малых залов состоят из микрофона, усилителя и динамических громкоговорителей, устанавливаемых в передней части зала.

Такие системы практически не требуют каких-либо дополнительных строительно-акустических мер по сравнению с залами с естественной

акустикой. Примеры размещения звукоусилителей в залах приведены на рис.10.

Современное развитие электроники позволило создать ряд новых систем с различными акустическими возможностями. К их числу относятся многоканальные системы широкоформатных кинотеатров, позволяющие по ходу действия на экране воспроизводить звук в разных зонах зрительного зала; амбиофонические системы, изменяющие время реверберации и создающие эффект эха. Создаются звукорежиссерские пульты, объединяющие указанные системы и позволяющие менять тональную окраску звучания по ходу театрального действия или музыкального исполнения. В настоящее время такими пультами оборудуются большие залы универсального назначения, телевизионные и радиостудии. Собственное время реверберации таких залов, достигаемое архитектурно-строительными средствами, должно составлять около 1, 8 сек. Такое время обеспечивает комфортные условия для находящихся в зале людей. Поглощающие материалы и конструкции в залах с электроакустическими системами должны быть распределены равномерно по всем поверхностям.

Практические рекомендации по проектированию

Исходными данными для выполнения работ являются назначение и вместимость зала, указанные в индивидуальных заданиях.

1. **Проектирование формы зала**

Расчет площади и рекомендуемые пропорции зрительного зала

Площадь зрительного зала определяется по вместимости и санитарной норме площади на 1 зрителя по формуле (4).

$$S = n \times N \qquad (4)$$

Здесь:

S – площадь зала в кв.м.

N - количество зрителей

n – норма площади на 1 зрителя в кв.м.

Нормы площади n для зрительных залов следует принимать:

n=1,0 – в кинотеатрах круглогодичного действия;

n= 0.9 – в кинотеатрах сезонного действия;

n= 0.8 – в лекционных аудиториях и конференц-залах;

n= 0.7 – в театрах.

Для большей диффузности звукового поля следует правильно выбрать форму и пропорцию зала. Основные размеры и пропорции зала должны выбираться из следующих условий (5):

$$L \le L_{доп}\ ; \quad B = S_n / L\ ; \quad H = V / S_n\ ; \quad 1 < L/B < 2\ ; \quad 1 < B/H < 2\ , \qquad (5)$$

Где: *L* - длина зала по его центральной оси, в м;

Lдоп - предельно допустимая длина зала, в м;

B и *H* - соответственно средние ширина и высота зала, в м;

V - общий воздушный объем зала в куб. м;

Sn - площадь пола зала, кв.м.

Прямоугольная форма в плане с плоским горизонтальным потолком допустима только для небольших лекционных залов вместимостью до 200 человек. Во всех других случаях зрительных залов оптимальной формой плана является трапециевидная с углом раскрытия 10 - 12°.

Площадь зрительного зала (включая балконы, ложи и ярусы} определяется в пределах ограждающих конструкций:

- для кинотеатров - включая эстраду,
- для клубов и театров - до передней границы эстрады (сцены, авансцены или барьера оркестровой ямы).

Максимальная длина залов *Lдоп*, должна составлять, м:

- в залах драматических театров, аудиториях , и конференц-залах 24 - 25;
- в театрах оперетты 28 - 29;

- в театрах оперы и балета 30 - 32;
- в концертных залах камерной музыки 20 - 22;
- в залах симфонической музыки, хоровых и органных концертов 42 - 46;
- в многоцелевых залах вместимостью более 1000 мест 30 - 34;
- в концертных залах современной эстрадной музыки 48 – 50.

Предельное удаление зрителей по оси зала от киноэкрана - 45 м.

Ширина оркестровой ямы:
- в театрах музыкально-драматических – 3-4 м
- в театрах музыкальной комедии – 4,5 м
- в театрах оперы и балета до 6 м

Размеры эстрады и сцены в м приведены в таблице 1:

Таблица 1.

эстрада				Сцена (стройпортал*)		
Мест в зале	Ширина	глубина	высота	Мест в зале	ширина	высота
300	9	6	5,5	500	8,5	5
400	12	7,5	6	600	10	6,5
500	15	9	7,5	800	12	7,5
600	18	12	9	1200	14	8,5
700	21	12	9	1500	16	9,5
800 и более	24	15	16			

* Портал – это проем сцены в передней стене зала.

Ширину авансцены принимают, как правило, равной 1,5 м

Сцены устраивают только в театрах. В остальных залах устраивают эстрады.

Высота сцены (эстрады) – 1 м.

В кинотеатрах и аудиториях высота эстрады 0,3 – 0,6 м.

Размещение зрительских мест и эвакуационных проходов

Размещение зрительских мест в зале диктуются условиями:

– обеспечения видимости и зрительного восприятия расчетных точек;

– типом и размерами кресел;

– условиями загрузки зрительских мест и правилами эвакуации из зала.

Требования эвакуации определяют размеры и положения эвакуационных проходов в зале. Ширина эвакуационных проходов рассчитывается по норме 0,6 м на каждые 100 зрителей, пользующихся проходом при эвакуации. При этом ширина каждого прохода должна быть не менее 1,2 м. Проходы должны обеспечивать минимальное время эвакуации из зала.

Размещение зрительских кресел в рядах должно соответствовать правилам, приведенным в таблице 2.

Таблица 2

Размеры кресел	Расстояние меду спинками соседних рядов	Мах количество кресел в ряду при выходе из ряда		Ширина прохода между рядами
глубина не более 0,4 м		В одну сторону	В две стороны	
	0,8 м	7	15	0,35
	0,85 м	12	25	0,4
ширина не более 0,5 м	0,9 м	20 (12)*	40 (24)*	0,45
	0,95	25	50 (40)*	0,5
	1,0 м	30 (26)*	50 (40)*	0,55

* Значения в скобках для театров.

При размещении зрителей в плане зала должны учитываться предельно допустимые углы зрения, как показано на рис.11.

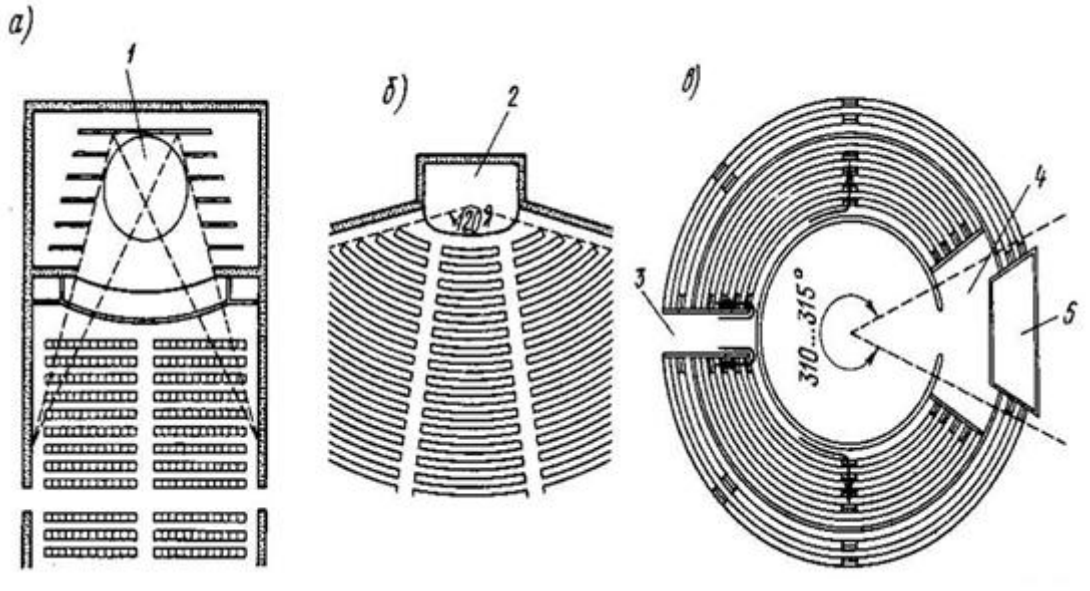


Рис. 11. Схемы построения горизонтальных углов видимости в залах:
а-оперных и драматических, б-с эстрадой, в-цирков.
1-сцена, 2-эстрада,

Предельные горизонтальные углы размещения зрителей приведены определяют сектора зрительских мест, как показан на рис. 12.

В соответствии с этими схемами:

Горизонтальный угол зоны зрителей:

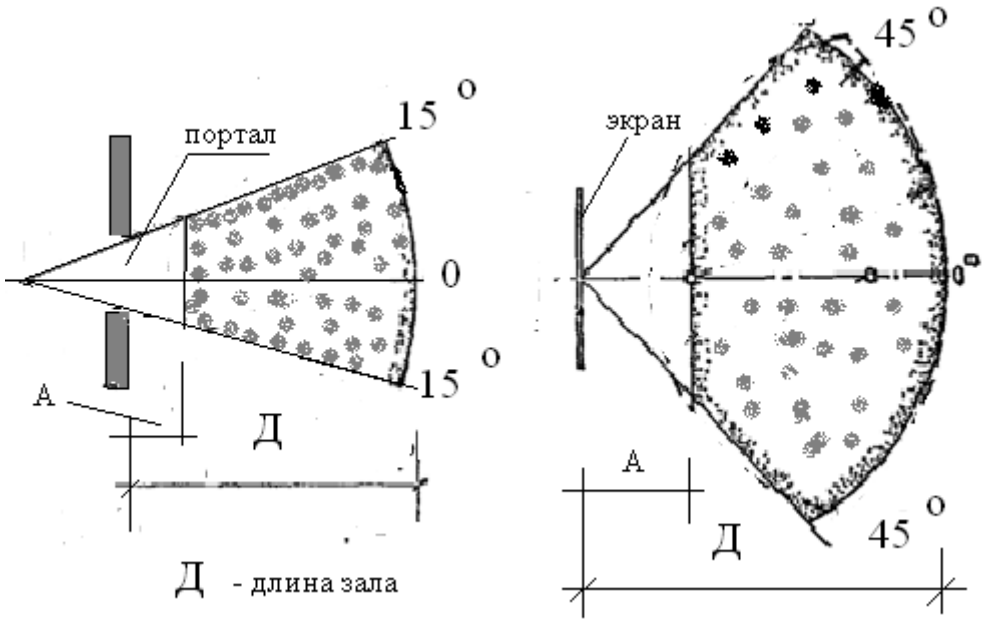


Рис.12. Зоны размещения зрителей в залах театров (слева) и кинотеатров (справа)

- для театров – по 15 градусов от оси зала
- Для кинотеатров – по 45 градусов от оси зала.

Расстояние А - от красной линии до первого зрителя принимается:

- при наличии оркестровой ямы не менее 4,5 м
- без оркестровой ямы – 2,5 м.

пространство за киноэкраном принимается от 0,9 до 1,5 м и зависит от типа экрана.

Вычисление требуемого объема зала

Воздушный объем зала определяется с учетом двух условий:

- Санитарных норм по формуле (2)
- Акустических требований по формуле (3)

$$V = c_n \times N \qquad (3)$$

Здесь: c_n – норма объема в куб.м. на 1 зрителя,

c_n =4 - 5 куб.м. – для речевых залов;

c_n = 6 - 7 куб.м. – для музыкально – драмматических залов;

c_n = 7 - 8 куб.м – для залов камерной музыки

c_n =8 – 10 куб.м – для симфонической музыки

c_n =10 – 12 куб.м – для хоровых органных концертов

c_n =4 – 6 куб.м – для многоцелевых, киноконцертных , современных эстрадных залов.
N – количество зрителей.

$$V = \frac{10^6}{f_{гр}} \qquad (4)$$

Здесь:

$f_{гр}$ - граничная частота. Ее принимают в зависимости от назначения зала:

- для речевых залов – не более 200 гц,
- для многоцелевых – не более 150 гц,
- для музыкальных – не более 100 гц.

В качестве конечного значения объема зала принимается большее из вычисленных по формулам (2) и (3) значений.

Построение профиля пола в зале

До построения профиля пола необходимо разместить зрительские места в зале. Профиль пола строится на продольном разрезе зала. Целью построения является создание превышения сзади сидящих зрителей над передними для обеспечения беспрепятственной видимости расчетных точек на сцене или эстраде.

Для построения профиля пола нужно определить:

- положение расчетной точки видимости (р.т.в). Она принимается:
  - в кинотеатрах - в центре нижней кромки киноэкрана,
  - в лекционных залах – в центре нижней кромки аудиторной доски или проекционного экрана,
  - в остальных залах – на уровне пола сцены или эстрады на красной линии.
- Красная линия сцены проходит по передней грани портала сцены. Красная линия эстрады - на 1 м от переднего края эстрады.
- положение головы зрителя, сидящего в 1 ряду по оси зала принимается на высоте 1,2 м от уровня пола.
- значение допустимого превышения луча зрения зрителя над головой впереди сидящего принимается равным 0,12 м. Допускается в театрах при шахматном расположении кресел принимать превышение 0,06 м.

Профиль пола может быть построен в виде кривой наименьшего подъема или ломаной линии по участкам.

Для построения кривой наименьшего подъема, как показано на рис.13 откладывают превышение над головой первого зрителя (0,12 или 0,06 м) и полученную точку соединяют с расчетной точкой видимости. Эту линию

продолжают до пересечения с положением спинки кресла сзади сидящего зрителя.

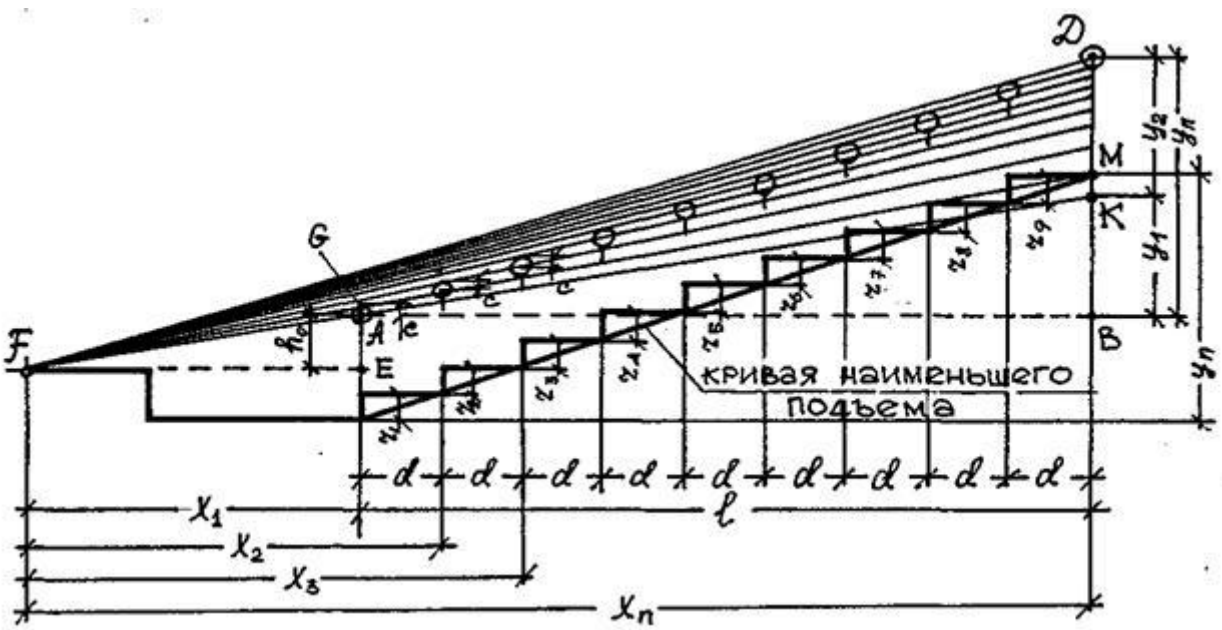


Рис.13. Построение кривой наименьшего подъема пола

Точка пересечения определяет положение его головы. Повторяя это построение для каждого следующего ряда, находят положение головы всех зрителей по данной оси зала. Профиль пола проходит параллельно на 1,2 м ниже по уровню.

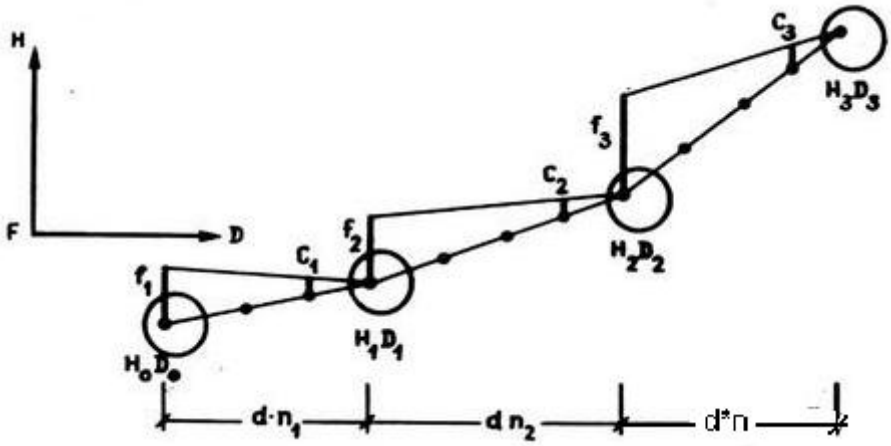


Рис.14. Построение ломаного профиля пола

Для построения ломаной линии профиля пола разбивают все ряды по оси зала на несколько участков (рис.14). Количество рядов в каждом последующем от сцены участке должно быть больше предыдущего. Над головой первого на участке зрителя откладывают превышение равное произведению нормы превышения (0,12 или 0,06 м) на количество рядов

на участке. Через полученную точку и расчетную точку видимости проводят линию до пересечения с последним рядом участка. Положение головы остальных зрителей на участке находится на линии, соединяющей головы первого и последнего зрителей на данном участке. Параллельная ей линия, проведенная на 1,2 м ниже – искомый профиль пола на участке.

Построение балконов и галерей

В залах вместимостью более 600 мест целесообразно устраивать балконы и галереи. Это позволяет:

- уменьшить длину зала,
- улучшает условия видимости и слышимости для удаленных зрителей,
- расчленяет пространство зала, способствуя создания диффузного звукового поля.

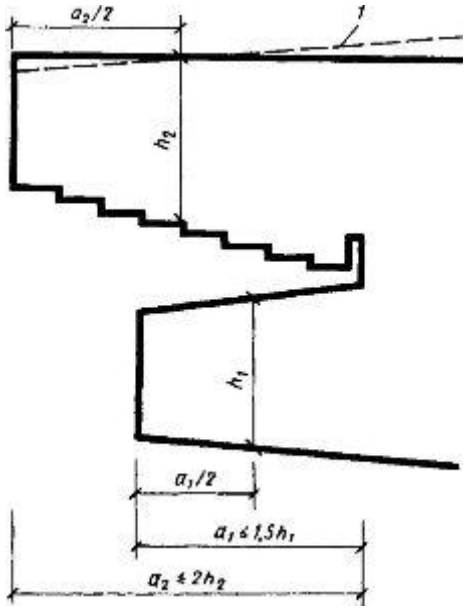


Рис.15. Проектирование балконов.
a1, h1 –вынос балкона и средняя высота подбалконной пазухи,
a2 – глубина балкона, – h2 средняя высота надбалконной пазухи

При проектировании балконов следует учитывать следующие правила (см.рис.15):

- Вынос балкона не должен превышать 1,5 средней высоты пазухи под балконом
- Глубина балкона не должна превышать более чем в 2 раза среднюю высоту пазухи над балконом.
- профиль пола балкона строится также как в партере.
- Глубина ложи не более полторы ее высоты.
- Минимальная высота пазухи под балконом 3,5 м.
- От потолка до головы последнего зрителя на балконе д.б. не менее 2,1 м.

Построение профиля потолка

Цель построения – оптимальное распределение по залу звуковой энергии, отраженной от потолка и направленной к зрителям, так называемых первых ранних отражений.

Для определения пути, проходимого отраженным звуком используют графический метод фокальных точек, показанный на рис.16.

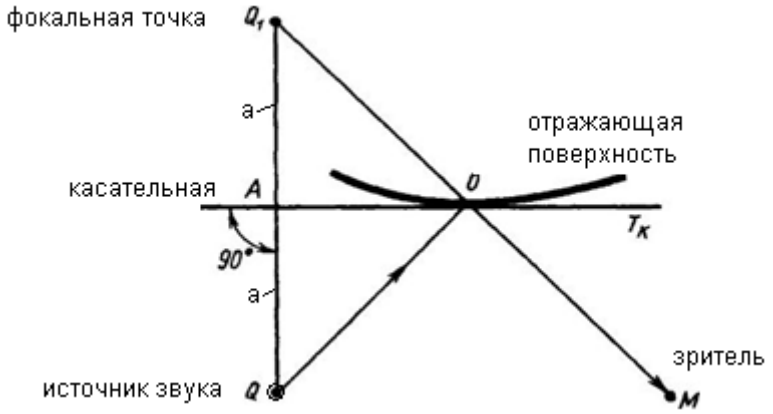


Рис.16. Метод фокальных точек

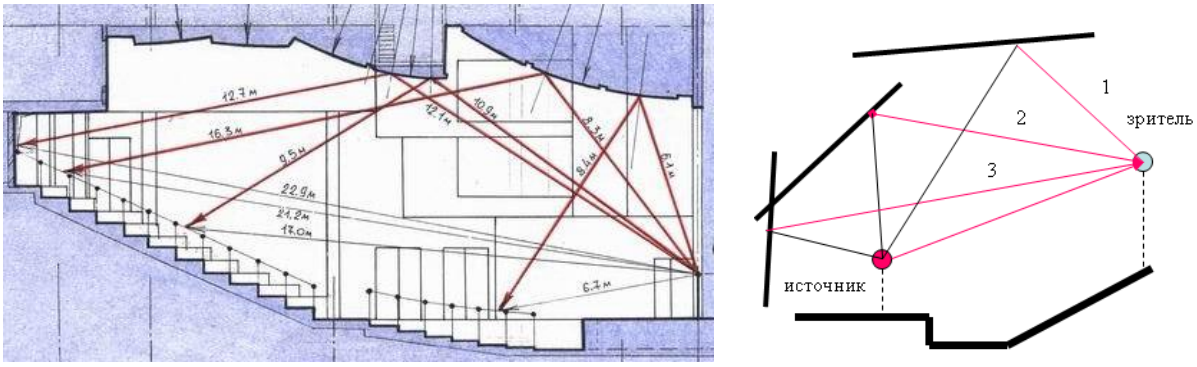


Рис.17. Зритель должен получать много отражений от ограждений в зале

Процесс построения потолка заключается в нахождении такого положения отдельных его участков, при котором:

- отраженная энергия распределяется в речевых залах на всех зрителей, а в музыкальных на сидящих далее 8 м от красной линии сцены или эстрады;
- чем дальше сидят зрители, тем большее количество отражений от разных участков они получают (рис.17);
- смежные зоны отражений от участков потолка перекрываются, как показано на рис.18;
- создается оптимальная структура ранних отражений (см. рис. 19).

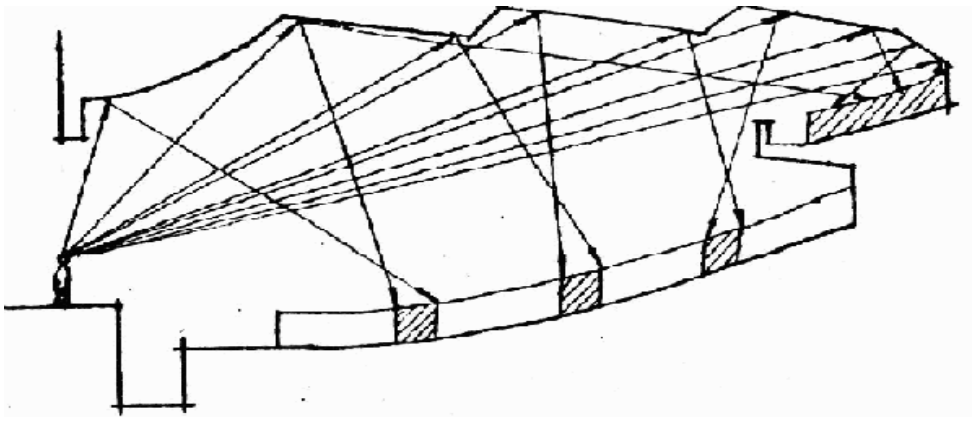


Рис.18. Зоны отражения должны перекрываться

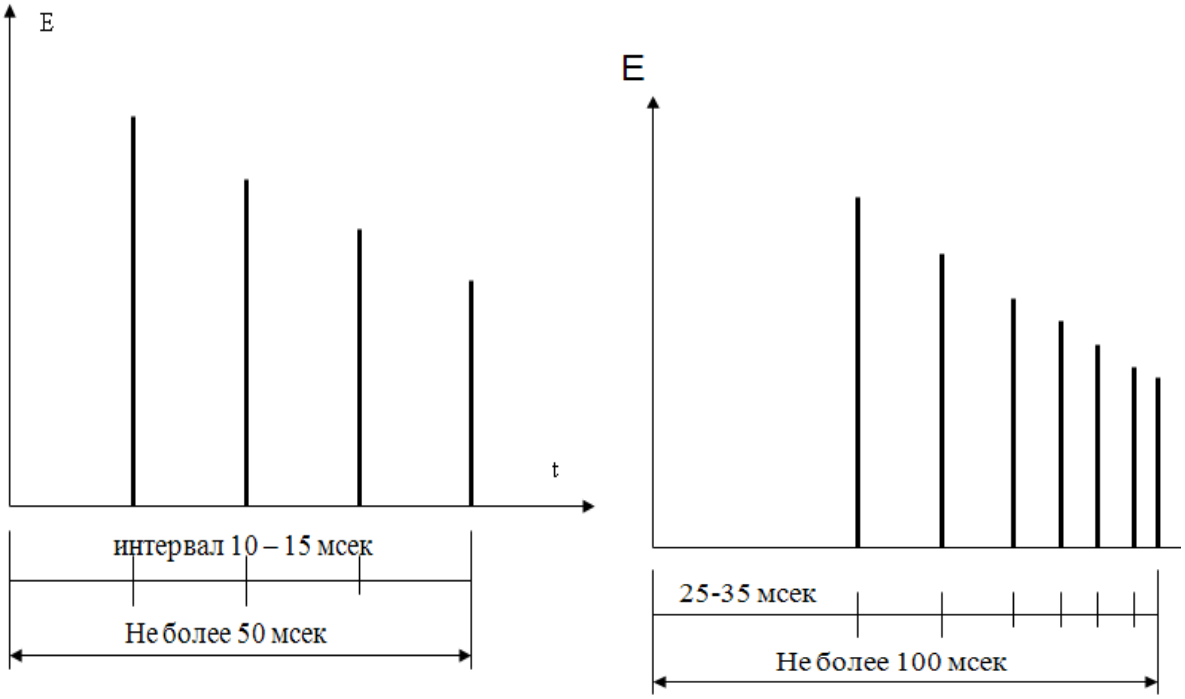


Рис. 19. Оптимальная структура ранних отражений в речевых (слева) и музыкальных залах

Поскольку путь, который проходит от источника до зрителя отраженный звук больше прямого, происходит отставание – запаздывание во времени отраженной энергии. Это запаздывание не должно превышать допустимых значений:

- 0,05 сек – для речевых залов,
- 0,1 сек – для музыкальных.

При скорости распространения звуковой энергии в зале равной 340 м/сек, допустимые значения разницы путей прямого и отраженного звука в метрах составят:

- 17 м – для речевых залов,
- 34 м – для музыкальных.

При проектировании потолка необходимо выдерживать такую высоту зала, при которой обеспечивается рассчитанный ранее объем.

Расчетное положение источников звука принимают:

- В кинозалах в соответствии с положением динамиков электро - акустической системы;
- В театральных, концертных, универсальных залах на красной линии сцены или эстрады на высоте 1,5 м от пола сцены (эстрады).

Переднюю часть зала часто используют для создания «акустической раковины», как показано на примере универсальных залов на рис.7.

Проверка применимости геометрической акустики

Законы геометрической акустики применимы при следующих условиях:

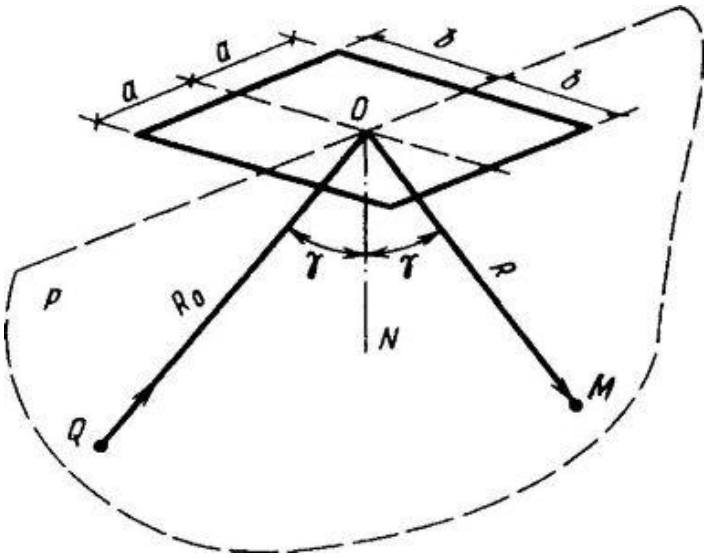


Рис.20. К проверке применимости геометрической акустики

- Звуковое поле в помещении диффузно;
- Наименьшая сторона участка отражающей поверхности (экрана, ограждения) не менее чем в 1,5 раза превышает длину отражаемой звуковой волны (см. рис 20);
- Отклонение в значениях уровня звука в точке приема М от строго геометрического не превышает 5 дб. Эта величина вычисляется по формуле (5).

$$\Delta L = 4{,}4 \times \left(\frac{1}{u} + \frac{1}{v} \right) \qquad (5)$$

В этой формуле:

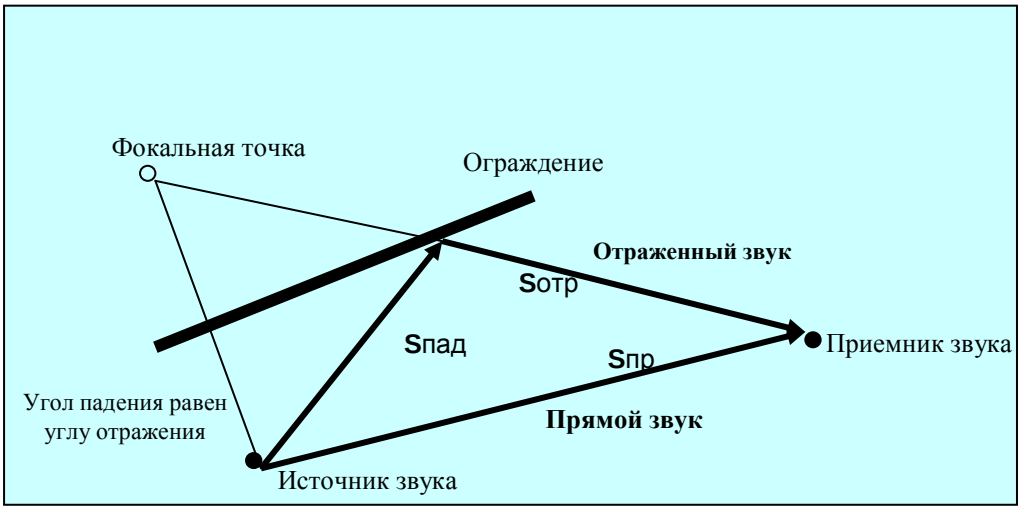
$$u = a \times \cos\gamma \sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{R_o} + \frac{1}{R}\right)}\,; \quad v = b\sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{R_o} + \frac{1}{R}\right)}\,; \qquad \lambda = \frac{c}{f}\,;$$

λ – длина звуковой волны в м, c – скорость звука (340 м/сек.),
f – нижние значения частот частоты звука, характерные для вида звучания, принимаемые: для речевых залов – 200 гц, для музыкальных – 100 гц, для универсальных – 150 гц.
a и b – половины сторон отражающего участка ограждения в м.

Определение структуры ранних отражений в зале

Поскольку наибольшее запаздывание ранних отражений наблюдается в передней зоне зала, а наибольшее количество дополнительной (отраженной) звуковой энергии требуется в конце зала, графики структуры ранних отражений целесообразно строить для этих зон. Порядок определения запаздываний следующий:

- Измеряются разности путей отраженных и прямого звука ΔS_i, для выбранного зрителя в зоне, как показано на рис.21.
- Вычисляются запаздывание в секундах по формуле (6),
- Вычисляется ожидаемое снижение уровня звука в отраженной волне по формуле (5).
- На графике по горизонтальной оси откладывается запаздывание в секундах, по вертикали уровни звукового давления с учетом снижения уровня звука в дБ.



ΔS=Sпад+Sотр –Sпр.

Различие в длинах пути звуковых волн, определяющее запаздывание отражения

Рис.21. К определению запаздывания отраженного звука от прямого

$$\delta t = \frac{\Delta S}{340} \quad (\text{сек}) \qquad (6)$$

2. Проектирование отделки

Определение границ зон ранних отражений на потолке

Границы зон поверхностей, дающих первые (ранние) отражения определяются графически по законам геометрической акустики. Построения начинают с отыскания проекций фокальных точек. Каждый участок потолка будет иметь свою фокальную точку и проекции этой точки на плане и разрезе, как показано на рис.22.

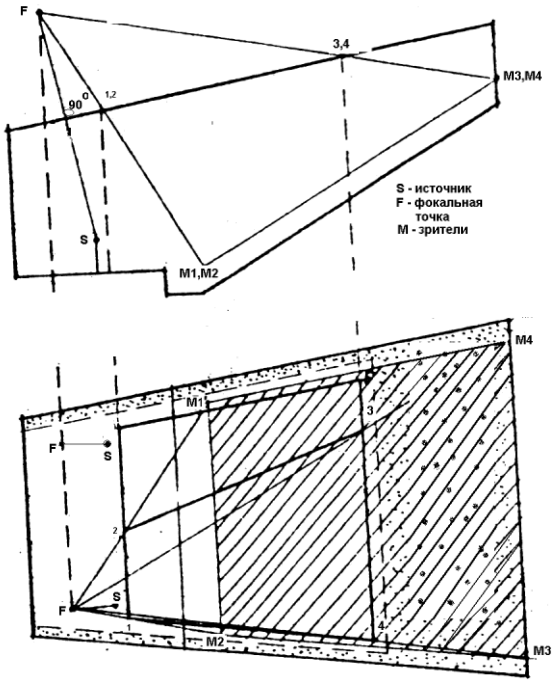


Рис.22. К определению зон ранних отражений на потолке

Порядок построения следующий:

- На разрезе из источника S проводят перпендикуляр к линии участка потолка и на продолжении на расстоянии равным длине отрезка от источника до потолка находят фокальную точку F;
- На плане проекция этой точки лежит на пересечении вертикали из фокуса - т.F и горизонтали из источника - т. S;
- Проводят лучи из фокальных точек к крайним зрителям в зале M1, M2, M3, M4. Там, где эти лучи на разрезе пересекаются с потолком находятся крайние точки зоны отражения (тт.1, 2, 3, 4).
- На пересечении перпендикуляров из этих точек с горизонтальными проекциями лучей FM1, FM2, FM3, FM4 находятся углы зоны ранних отражений на потолке.

- С учетом возможных явлений дифракции (огибания звуковыми волнами краев участков), полученную зону расширяют во все стороны на величину 0,5 м.

Зоны ранних отражений на боковых стенах

Зоны ранних отражений на стенах определяют тем же способом, но в ином порядке:

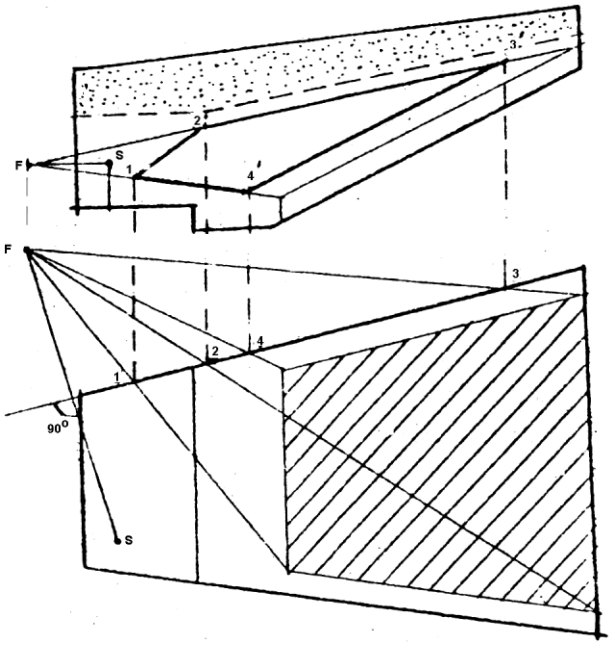


Рис.23. К определению зон ранних отражений на стенах

- начинают построения с определения фокальных точек на плане (см.рис.23).
- Вертикальная проекция фокальной точки находится на пересечение вертикали из т.F и горизонтали из проекции источника на разрезе. Обычно это 1,5 м от пола сцены или эстрады.
- Горизонтальные проекции фокальных точек соединяют с крайними зрителями на плане зала и на пересечении со стеной получают тт.1, 2, 3, 4;
- Проводят на разрезе лучи из фокуса к крайним зрителям;
- На пресечении вертикалей из тт.1,2,3,4 с лучами на разрезе находят крайние точки зоны ранних отражений
- Полученную на разрезе зону расширяют во все стороны на 0,5 м.

Выбор зон и подбор материалов акустической отделки зала

При проектировании отделки зала необходимо учитывать три важных требования для создания хорошей акустики:

- Использовать полезные ранние направленные отражения для усиления звука

- Создать диффузное (равномерное) звуковое поле в зале
- Обеспечить оптимальную продолжительность процесса реверберации

В соответствии с этими задачами в зале должны быть поверхности:

1. выполненные в виде плоских хорошо отражающих звук участков, отделанных материалами с очень малым коэффициентом звукопоглощения.
2. хорошо отражающие звук в разные стороны (рассеяно, диффузно), для этого они должны быть не плоскими, а профилированными, объемными или как говорят пластически обработанными
3. выполненные из материалов и конструкций хорошо поглощающих звук в широком диапазоне частот.

Границы зон раннего отражения определены в предыдущем разделе.

Зоны эффективного звукопоглощения располагают на задней стене в углах примыкания стен и потолков – для устранения двойных отражений

Зоны диффузного отражения занимают остальную часть поверхностей.

Расчет эквивалентной площади звукопоглощения в зале

Главным количественным критерием при подборе материалов отделки является время реверберации в зале. В общем случае, в соответствии с формулой Сэбина (7) в двух помещениях с равным объемом время реверберации зависит только от звукопоглощения в зале Аобщ.

$$T = \frac{0.161 \times V}{Aîáù} \qquad (7)$$

Эту характеристику называют эквивалентной площадью звукопоглощения (ЭПЗ), так как она учитывает не только площади ограждений (стен, потолка, пола и т.д.) и заполнения зала (кресла, зрители, оборудование) но и их звукопоглощающие свойства. Ее вычисляют по формуле (8)

Аобщ.=Апост.+Апер.+Адоб. (8)

Здесь:

- Апост. = Ас – суммарное звукопоглощение поверхностями в зале, вычисляемое по формуле (9) используя данные по акустическим свойствам материалов в приложении 1;
- Апер. = Аn – звукопоглощение креслами и зрителями вычисляют по формуле (10) и данным таблицы 3;

- Адоб.= Ad – неучтенное звукопоглощение за счет утечек звука через неплотности в ограждениях, поглощение оборудованием, осветительной арматурой и т.д. Вычисляется по формуле (11) и данным приложения 1.

$$Ac = \Sigma S_i \times \alpha_i \qquad (9)$$

$$An = Ak \times n_k + Az \times n_z \qquad (10)$$

$$Ad = \alpha_d \times S_o \qquad (11)$$

Таблица 3.

Звукопоглощение зрителями и креслами

	Наименования	ЭПЗ в кв.м.					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	Слушатель на мягком или полумягком кресле	0,25	0,30	0,40	0,45	0,45	0,40
2	То же на жестком	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35	0,35
3	Кресло мягкое обитое тканью с пористым наполнителем	0,15	0,20	0,20	0,25	0,30	0,30
4	Кресло полумягкое, обитое тканью	0,08	0,10	0,15	0,15	0,20	0,20
5	То же обитое кожей	0,08	0,10	0,12	0,10	0,10	0,08
6	Кресло жесткое с фанерными сдением и спинкой	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05

Из формулы Сэбина видно, что время реверберации тем больше, чем меньше звукопоглощение (гулкий зал), и наоборот, чем больше звукопоглощение, тем время реверберации меньше (глухой зал).

Задача проектировщика подобрать такую отделку интерьера, при которой звукопоглощение обеспечить оптимальное время реверберации в зале. Рекомендуемые значения оптимального времени реверберации Топт. в залах различного назначения и объема определяются по графику на рис.20.

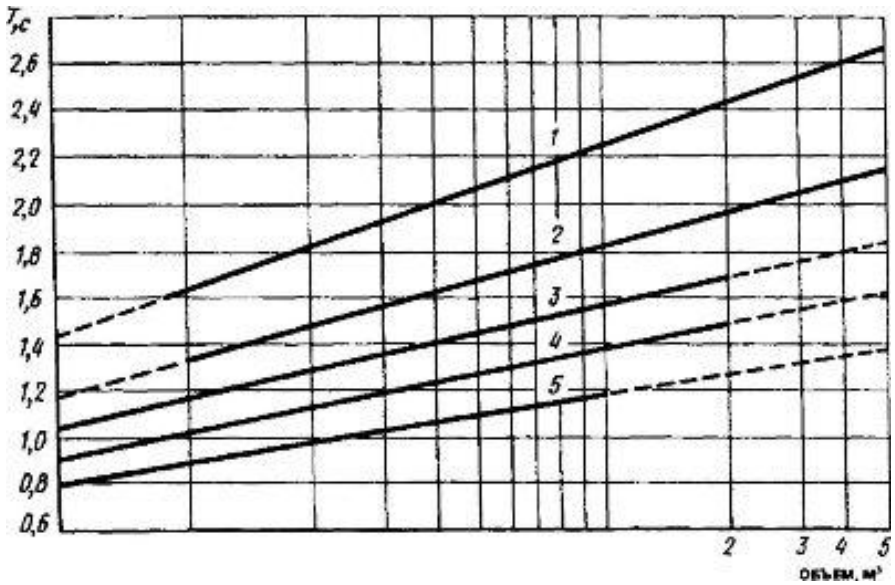


Рис.20. Рекомендуемое время реверберации на частотах 500 - 2000 Гц для залов:
1 – органные и хоровые; 2 – оперные и симфонические 3 – музыкально--драматические; 4 - драмтеатры; 5 – кинозалы и аудитории

Алгоритм подбора отделки можно представить блок-схемой показанной на рис.21, где Тр, Топт. – соответственно расчетное и оптимальное время реверберации.

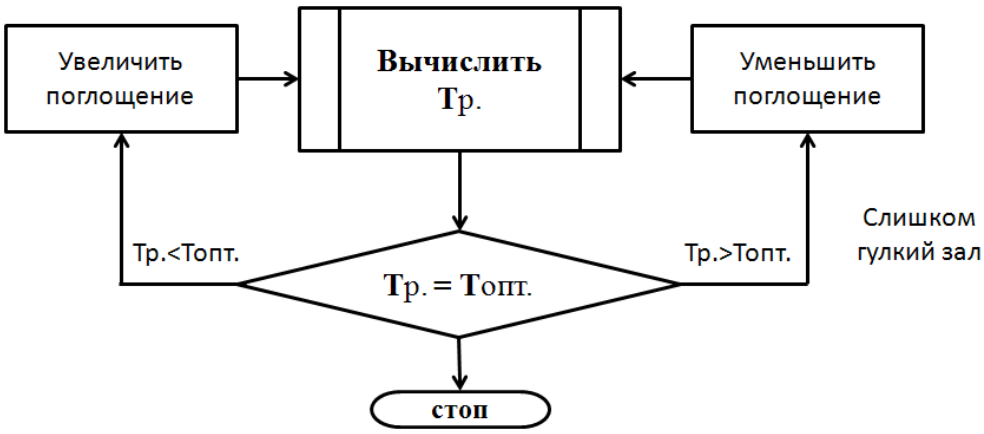


Рис. 21. Алгоритм подбора отделки интерьера зала.

Вычисление звукопоглощения Аобщ. удобно проводить в табличной форме, как показано на рис 22.

Вычисление времени реверберации в зале

Время реверберации обычно вычисляют на низких (125 гц,) средних (500 гц.) и высоких (2000гц.) частотах. Расчет производится по формуле Эйринга (12), более точно определяющей Тст. при значениях среднего коэффициента звукопоглощения больших 0,2. Расчет делают при полном заполнении зала зрителями и для случая заполнения 75% мест.

Постоянное звукопоглощение									
№№ п/п	Наименование	Вид отделочного материала или звукопоглощающей конструкции	Площадь в кв.м	Коэффициенты звукопоглощения			Эквивалентная площадь		
				125 гц	500 гц	2000 гц	125 гц	500 гц	2000 гц
	Передняя стена	(зона ранних отражений)	100	0,1	0,2	0,2	10	20	20
		(проем сцены)	100	0,3	0,3	0,3	30	30	30
		(занавес)	100	0,3	0,3	0,3	30	30	30
	боковые стены	(зона ранних отражений)	100	0,3	0,3	0,3	30	30	30
		(проем сцены)	100	0,3	0,3	0,3	30	30	30
		(занавес)	100	0,3	0,3	0,3	30	30	30
	задняя стена	(зона ранних отражений)	100	0,3	0,3	0,3	30	30	30
		(проем сцены)	100	0,3	0,3	0,3	30	30	30
		(занавес)	100	0,3	0,3	0,3	30	30	30
	потолок	(зона ранних отражений)	100	0,3	0,3	0,3	30	30	30
		(проем сцены)	100	0,3	0,3	0,3	30	30	30
		(занавес)	100	0,3	0,3	0,3	30	30	30
	пол не занятый			0,3	0,3	0,3	30	30	30
			100						
	суммарная площадь поверхностей в зале		1300						
	Постоянное звукопоглощение						370	380	380
	неучтенное звукопоглощение			0,06	0,03	0,02	78	0	0
	ИТОГО постоянное и добавочное звукопоглощение						**448**	**380**	**380**

Переменное звукопоглощение									
			количество зрителей и кресел	звукопоглощение одним креслом или зрителем на частотах			звукопоглощение креслами или зрителями на частотах		
				125 гц	500 гц	2000 гц	125 гц	500 гц	2000 гц
	зрители	в мягком кресле 100%	600	0,25	0,4	0,45	150	240	270
	зрители	в мягком кресле (75%)	450	0,25	0,4	0,45	112,5	180	202,5
	кресла	мягкое (25%)	150	0,15	0,2	0,3	22,5	30	45

Общее звукопоглощение в зале					
	ИТОГО	Общее звукопоглощение при 100% зрителей	598	620	650
	ИТОГО	Общее звукопоглощение при 75% зрителей	583	590	627,5

Рис.22. Пример таблицы расчета ЭПЗ

$$Tp = \frac{0.163 \times V}{So \times \varphi(\alpha) + n \times V} \qquad (12)$$

где V – объем зала в куб.м.

$\varphi(\alpha) = -\ln(1-\alpha)$ - значения функции даны приложении 2;

So- суммарная площадь поверхностей ограждений в кв.м.

средний коэффициент звукопоглощения вычисляется по формуле (13)

$$\alpha = \frac{Ao}{So} \qquad (13)$$

Поглощение звука воздухом учитывают только на высоких частотах. При этом значение коэффициента n принимают из приложения 1.

Вычисленные значения стандартного времени реверберации сравнивают с оптимальными для данного зала.

Для сравнения строится график оптимальных значений времени реверберации с учетом допустимых 10%-ых отклонений. При этом принимают оптимальные значения для 2000 гц и 500 гц равными. Оптимальное время реверберации для 500 гц можно определять по

графикам рис.20. Значения для 125 гц. принимают на 15 - 20% выше по сравнению с 500 гц. Пример графика оптимальных значений времени реверберации в зале приведен на рис. 23.

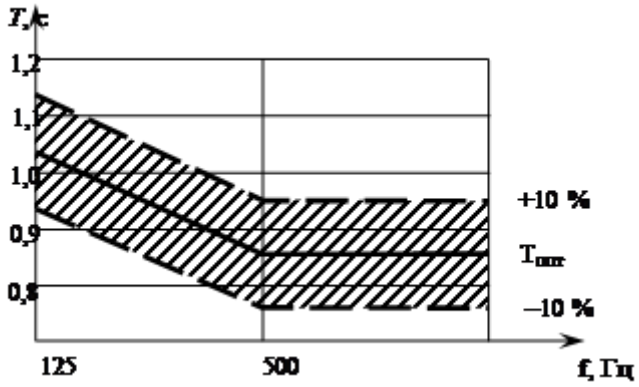


Рис. 23. Пример графика оптимальных значений времени реверберации в зале

Расчетные значения времени реверберации в зале должны соответствовать рекомендуемой зоне оптимальных значений.

Подбор параметров пластической обработки поверхностей в зале

Для формирования диффузного звукового поля необходимо, чтобы значительная часть внутренних поверхностей ограждений в зале создавала рассеянное, ненаправленное отражение звуковых волн. Это достигается расчленением поверхностей балконами, галереями, пилястрами, нишами и прочими элементами. Характер расчленений должен соответствовать основному диапазону звуковых частот в зале, характерному для данного типа зала (см. таблицу 4). Это связано с тем, что хорошо рассеиваются звуковые волны, длина которых соответствует размерам членений.

Таблица 4

Характеристика источников звуков в залах

Источники	Диапазон частот в гц.		Уровни звука в дб.	
звука	от	до	в 1 метре	в 10 метрах
оратор	200	4000	70	40
Драм.артист	200	4000	75	45
солист	100	8000	80	50
Кам.оркестр	20	20000	80	50
хор	100	8000	85	60
Симф.оркестр	20	20000	90	65

Так, например, эффективное рассеивание в области частот 200-600 гц дают пилястры шириной 1-2 м, глубиной 0.5-1 м при шаге 2-4 м. Если

поверхность этих пилястр подвергнуть дальнейшему расчленению, то может быть достигнуто рассеивание в широком диапазоне частот.

Рекомендуемые параметры пластической обработки поверхностей в залах приведены на рис. 24.

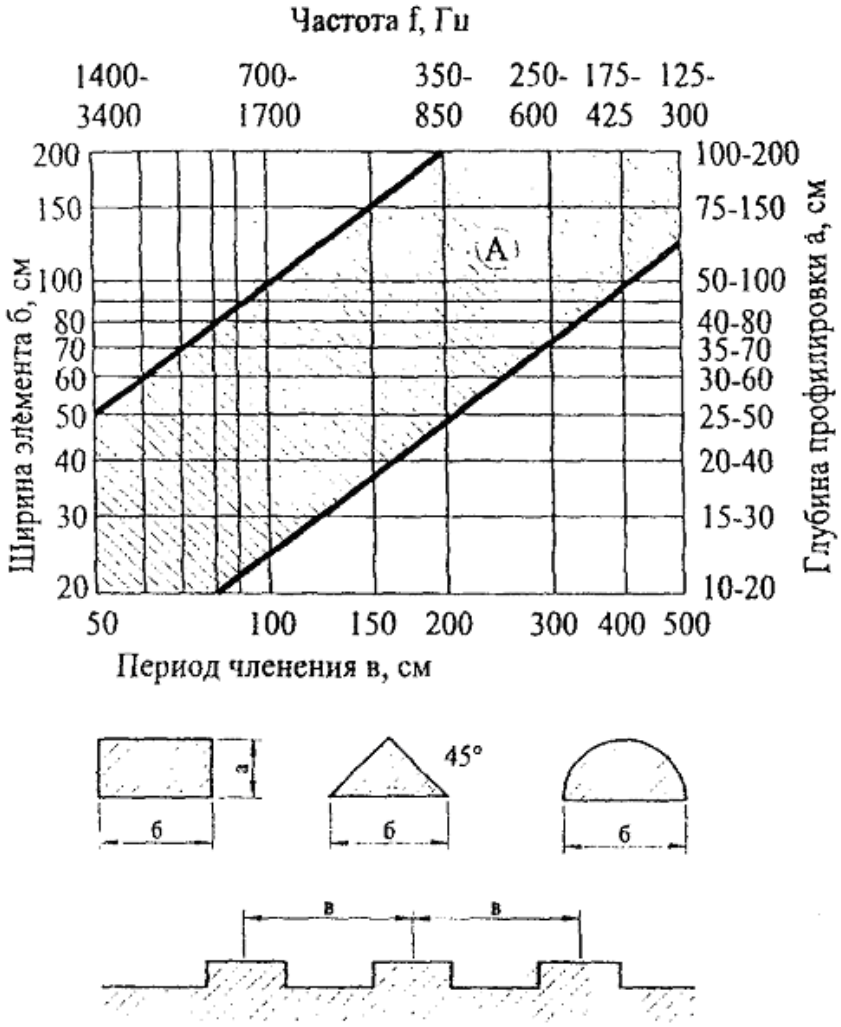


Рис. 24. Подбор параметров членения ограждений

Литература:

1. Рекомендации по проектированию концертных залов.: Москомархитектура:, 2004г.,
2. СНиП 2.08.02-89* Общественные здания и сооружения.
3. Руководство по акустическому проектированию залов многоцелевого назначения средней вместимости. НИИСФ Госстроя СССР. 1981.
4. Иордан В.Л., Акустическое проектирование концертных залов и театров. Перев. с англ. С.А. Хомутова, под ред. Л.И. Макриненко. М., Стройиздат, 1986, 170 с., илл,
5. Качерович А.Н. Акустика зрительного зала.: М.: Искусство: 1968.
6. Кнудсен Верн О., Архитектурная акустика., пер. с англ.: изд.5: 2010, - 520 с.
7. Архитектурная физика, Оболенский Н.В., Учебник,: М,: Архитектура-С,: 2005, - 448 с.
8. Проектирование акустики зрительных залов., Методические указания.,: составитель Удлер Е.М.: Казань,: КИСИ: 1980, - 35 с.

Приложение 1

Звукопоглощающие свойства материалов,
конструкций и оборудования залов

№№	Материалы и конструкции	Коэфф.звукопоглощения на частотах:					
		125	250	500	1000	2000	4000
1.	Бетонная стена гладкая неокрашенная	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
2.	То же с железнением поверхности	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
3.	Мрамор, гранит	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
4.	Кирпичная стена Неокрашенная, неоштукат.	0,02	0,02	0,04	0,05	0,06	0,06
5.	То же окрашенная	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
6.	То же оштукат., с клеевой окр.	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
7.	То же с масляной окраской	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
8.	Штукатурка по металл. сетке	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
9.	То же по дерев. обрешетке	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
10.	Сосновая паель толщ. 19 мм	0,10	0,11	0,06	0,08	0,08	0,11
11.	Фанере плотно на стене	0,05	0,06	0,06	0,10	0,10	0,10
12.	ДСП толщ.20 мм на относе от стены 50 - 150 мм	0,10	0,08	0,05	0,05	0,08	0,10
13.	Паркет по асфальту	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
14.	Паркет по лагам	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
15.	Линолеум на твердой основе	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
16.	Релин по дощатому полу	0,04	0,05	0,07	0,10	0,06	0,08
17.	Пол дощатый на лагах	0,10	0,10	0,10	0,08	0,08	0,09
18.	Застекленные окна	0,03	0,02	0,15	0,10	0,06	0,04
19.	Панель дерев. Толщ. 5-10 мм С возд. прослойкой 50 – 150 мм	0,30	0,15	0,06	0,05	0,04	0,04
20.	ДВП 4 мм, γ = 1000 кг/м3 С возд. прослойкой 50 – 150 мм	0,3	0,16	0,08	0,05	0,04	0,08
21.	Панель из фанеры 4 мм С относом 100 мм	0,30	0,28	0,18	0,09	0,12	0,20
22.	То же 8мм, с относом 150 мм	0,37	0,18	0,10	0,10	0,05	0,09
23.	То же 5мм, с относом 50	0,17	0,04	0,14	0,10	0,08	0,08
24.	Плиты ПА/Д без возд.прослойки	0,05	0,40	0,40	0,40	0,20	0,10
25.	То же с возд.прослойкой 50мм	0,15	0,40	0,40	0,40	0,20	0,10

26.	То же с возд.просл. 100 мм	0,25	0,40	0,40	0,40	0,20	0,10
27.	Войлок волосяной 25 мм	0,18	0,30	0,70	0,80	0,82	0,85
28.	Ковер шерстяной на войлочн. подкладке по бетону	0,11	0,14	0,37	0,40	0,27	0,37
29.	Портьеры х/б вес 0,5 кг/м2	0,05	0,30	0,45	0,70	0,65	0,50
30.	Портьеры плюшевые 0,65 кг/м2	0,15	0,35	0,55	0,70	0,70	0,65
31.	Ак.фибролит 35 мм, 300 кг/м3	0,06	0,16	0,25	0,38	0,59	0,63
32.	То же на относе 100 мм	0,06	0,27	0,46	0,35	0,54	0,60
33.	Плиты ак.минватные ПА/С	0,05	0,15	0,60	0,80	0,85	0,80
34.	Плиты Акмигран 3030х2см	0,05	0,15	0,50	0,65	0,65	0,70
35.	То же в/п 200 мм	0,35	0,60	0,60	0,65	0,70	0,75
36.	Плиты гипс.перфорир. 26 мм С в/п. 200 мм	0,25	0,65	0,65	0,60	0,55	0,30
37.	Фибролит 50 мм с в/п 50-100мм	0,20	0,45	0,45	0,50	0,60	0,65
38.	Ткань бархатная 65 г/м2	0,05	0,12	0,35	0,45	0,38	0,36
39.	Киноэкран	0,30	0,35	0,40	0,40	0,40	0,40
40.	Проем сцены с декорациями	0,20	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
41.	Ковер с войл.ворсом на дощ.полу	0,11	0,13	0,28	0,45	0,29	0,30
42.	Неучтенное (доб) звукопоглощ.	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	0,01
43.	Плиты Ecophon (Швеция) без в/п	0,03	0,12	0,43	0,77	0,95	0,80
44.	То же с в/п 200 мм	0,33	0,70	0,97	0,82	0,95	0,95
45.	Ак.плиты «Шуманет-БМ»	0,25	0,63	1,00	1,00	1,00	0,90
46.	То же на относе 50 мм	0,55	0,90	1,00	1,00	0,90	0,85
47.	МДФ Décor Acoustic 750 кг/м3	0,30	0,65	0,80	0,80	0,55	045
48.	Панели Марру (Италия)	0,10	0,35	0,50	0,60	070	0,77
49.	Ак. Обои Texdecor (Франция)	0,06	0,06	0,15	0,27	0,40	0,40
50.	Ак.потолок Armstrong	0,35	0,85	0,90	0,90	1,00	1,00
51.	ППГЗ Knauf	0,15	0,30	0,40	0,40	0,27	0,20
52.	То же на относе 50 мм	0,22	0,52	0,83	0,70	0,45	0,37
53.	То же с минватой	0,45	0,98	0,95	0,80	0,52	0,32
54.	SonaSpray (США) 15 мм	0,10	0,20	0,45	0,80	0,90	0,90
55.	То же 25 мм	0,10	0,30	0,75	0,98	0,99	0,99
56.	То же 60 мм	0,40	0,80	1,00	0,98	0,98	0,98
57.	Ак. Панели Saundlux 40 мм	0,15	0,68	1,00	1,00	0,90	0,80
58.	Heradesign (Австрия) 50 мм	0,10	0,45	0,90	1,00	1,00	0,90
59.	То же 200 мм	0,45	0,85	0,95	0,90	0,95	0,95

Приложение 2

Значения функции $\varphi(\alpha) = -\ln(1-\alpha)$

α	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	0,10	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,19	0,20	0,21
0,2	0,22	0,24	0,25	0,26	0,27	0,29	0,30	0,32	0,33	0,34
0,3	0,36	0,37	0,39	0,40	0,42	0,43	0,45	0,46	0,48	0,49
0,4	0,51	0,53	0,54	0,56	0,58	0,60	0,62	0,64	0,65	0,67
0,5	0,69	0,71	0,73	0,76	0,78	0,80	0,82	0,84	0,87	0,89
0,6	0,92	0,94	0,97	0,99	1,02	1,05	1,06	1,11	1,14	1,17
0,7	1,20	1,24	1,27	1,31	1,35	1,39	1,43	1,47	1,51	1,56
0,8	1,61	1,66	1,72	1,77	1,83	1,90	1,97	2,04	2,12	2,21

Приложение 3

Содержание работ

А. Пояснительная записка:

Введение

Определение размеров и формы зала

- Расчёт объёма и средних размеров зала
- Геометрическое проектирование зала
- Построение профиля пола, стен и потолка
- Расчёт и построение структуры ранних отражений
- Определение зон ранних отражений на поверхностях

Акустический расчёт зала

- Определение расчётного времени реверберации Тр
- Выбор звукопоглощающих материалов и конструкций
- Определение расположения и площадей звукопоглощающих материалов
  - Определение оптимального времени реверберации Топт
  - Корректировка звукопоглощения помещения
- Проектирование пластической обработки поверхностей
- Литература

Б. Графические материалы

- Построение профиля пола, стен и потолка помещения
- Развёртка помещения с изображением мест установки звукопоглощающих материалов
- Разрез и план помещения с изображением профилей (пластической обработки) его плоскостей
- Картина ранних отражений от поверхностей (ограждений)
- Графики расчётного/оптимального времени реверберации
- Спецификация материалов отделки интерьера

Приложение 4

ЗАДАНИЕ

на выполнение работ по курсу

«Архитектурная акустика»

Студенту _____ группы _____

Дата выдачи задания _____

Преподаватель _____

Часть 1

Тема: Построение плана и продольного разреза зрительного зала

Назначение зала _____

Количество зрительских мест _____

Порядок выполнения работы:

1. определение параметров сцены (эстрады)
2. размещение зрительских мест в плане
3. определение характерных точек видимости
4. построение профиля пола
5. определение положения источников звука
6. определение характерных точек восприятия звука
7. построение стен на плане зала
8. построение профиля потолка
9. определение зон ранних отражений на стенах и потолке

Состав представляемых графических и расчетных материалов:

1. план зала с размещением зрительских мест и линиями построения стен в масштабе 1:100
2. продольный разрез зала с линиями построения пола и потолка в масштабе 1:50 или 1:100
3. развертка стен с построение зон ранних отражений
4. план потолка с построением зон ранних отражений
5. Расчеты геометрических размеров и требуемых акустических характеристик зала
6. Графики структуры ранних отражений в зале

Форма представления графических материалов (по выбору):

1. Ручной чертеж на бумаге формата А3
2. Распечатка на бумаге формата А3

Сроки представления графических материалов и расчетов _____

Часть 2

Тема: Акустический подбор отделки интерьера зала

Подосновой для выполнения работы являются результаты части 1

Порядок выполнения работы:

1. Подбор типа кресел в зале
2. выбор материалов и подсчет площадей зон раннего отражения
3. выбор параметров и материалов пластической обработки и подсчет площадей зон диффузного отражения
4. определение границ, подбор материалов и подсчет площадей зон звукопоглощения
5. Составление таблицы и расчет времени реверберации в зале
6. Построение частотного графика времени реверберации и сравнение с оптимальными значениями

Расчет времени реверберации произвести для случаев 75% и 100% заполнения зала зрителями на частотах 125 гц, 500 гц и 2000 гц.

Состав представляемых графических и расчетных материалов:

1. план зала с указанием материалов отделки в масштабе 1:100
2. план потолка с указанием материалов отделки в масштабе 1:100
3. развертка стен с указанием материалов отделки в масштабе 1:100
4. характерные сечения стен с указанием размеров в масштабе 1:10
5. таблица расчета времени реверберации
6. частотный график расчетного и оптимального времени реверберации в зале

Форма представления графических материалов (по выбору):

1. Ручной чертеж на бумаге формата А3
2. Распечатка на бумаге формата А3

Расчеты, таблицы, графики представляются в форме сброшюрованной пояснительной записки формата А4.

Срок представления выполненной работы _____